

---

Charakterisierung elektrischer Kontakt-Entladungen  
im Bereich niedriger Spannungen  
im Zündgrenz-Bereich von Wasserstoff-Luft-Gemisch

Dissertation zur Erlangung des  
akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Ilmenau

von M.Eng. Carsten Über

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich, TU Ilmenau

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger, TU Ilmenau

Dr.-Ing. Udo Gerlach, Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Tag der Einreichung: 9. November 2018

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 20. Mai 2019

---

*„Das Leben ist wie Fahrrad fahren.  
Um die Balance zu halten, musst Du in Bewegung bleiben.“*  
Albert Einstein

## Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) im Fachbereich 3.6 Explosionsgeschützte Sensorik und Messtechnik in Braunschweig.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich für die sehr gute Betreuung und die Begutachtung dieser Arbeit. Weiterhin möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger und meinem Mentor bei der PTB Dr.-Ing. Udo Gerlach für die vielen wertvollen Gespräche und die weiteren Begutachtungen danken. Frau Univ. Prof. Dr.-Ing. Edda Rädlein danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Den Fachbereichsleitern Dr.-Ing. Ulrich Johannsmeyer und Dr.-Ing. Frank Lienesch danke ich für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Forschungsarbeit, das Vertrauen in mich sowie die sehr gute Unterstützung.

Die Erstellung einer Dissertation lebt von kritischen Fragen, der konstruktiven Diskussion und hilfreichen Anregungen. Dafür möchte ich mich bei allen direkt und indirekt Beteiligten bedanken, die durch ihre wertvolle Unterstützung zum Gelingen dieser interdisziplinären Arbeit beigetragen haben. Hierzu gehören auch alle Studierenden, die mich im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten in meinen Aufgaben unterstützt haben, sowie alle, die mit ausgezeichneter Arbeit an der Erstellung der experimentellen Aufbauten beteiligt waren.

Abschließend möchte ich mich bei Ulrike für die Unterstützung und Geduld sowie bei Marlene und Viktoria für ihr Verständnis bedanken.

## Kurzfassung

Elektrische Entladungen, die bei schaltenden elektrischen Kontakten oder beim Ziehen einer Steckverbindung unter Spannung entstehen können, sind eine bedeutende Zündquelle in explosionsfähigen Atmosphären. Elektrische Komponenten in solchen Atmosphären entsprechen daher einem Zündschutzkonzept wie beispielsweise der Eigensicherheit „i“. Hierbei werden durch definierte Begrenzung von elektrischen Parametern Zündungen verhindert. Das wird nach dem Stand der Technik mit dem IEC-Funkenprüfgerät getestet, indem mit der Energie der Testkomponente elektrische Entladungen in einem explosionsfähigen Gasgemisch erzeugt werden. Die komplexen Phänomene der auftretenden Entladungstypen sind jedoch bis heute noch nicht vollständig verstanden. Die Ergebnisse der Prüfgeräte streuen stark und können zu Wettbewerbsverzerrungen führen. Zum Erreichen reproduzierbarer Ergebnisse ist es daher notwendig, eine verbesserte alternative Prüfmethode zu entwickeln.

Diese soll die für die Zündung relevante elektrische Entladung nachbilden. Das Ziel ist, die Zündgrenzwerte durch diese Prüfmethode möglichst einfach und reproduzierbar bestimmen zu können. Dies wird durch einen Lösungsansatz erreicht, der auf der Verwendung der Zündgrenzwerte basiert, wie sie sich im IEC-Funkenprüfgerät bei einer definierten Zündwahrscheinlichkeit unter Worst-Case-Bedingungen ergeben. Hierzu wird eine spezielle Kontaktvorrichtung verwendet, mit der diese Entladungen unter Worst-Case-Bedingungen gezielt erzeugt werden.

Die Untersuchungen umfassen daher die Ermittlung der Worst-Case-Bedingungen und die Charakterisierung der Entladungen bei Öffnungsvorgängen in einem Wasserstoff-Luft-Gemisch mit Stromwerten kleiner als 60 mA und einer maximalen Spannung von 30 VDC. Dabei werden die Strom-Spannungs-Kennlinie, das optische Spektrum, eine Abschätzung der Temperatur und eine vereinfachte Bewertung der Zündfähigkeit über den Leistungsverlauf einschließlich der Abschätzung der Messunsicherheit dargestellt.

Die Nachbildung orientiert sich an der Physik der Entladung, ermöglicht reproduzierbare Ergebnisse und kann in einem Prüfgerät oder einem Programm eingesetzt werden. Die Arbeit bildet eine erste Grundlage für eine alternative Prüfmethode zum bisherigen IEC-Funkenprüfgerät, deren Ergebnisse in die internationale Normung einfließen können.

## Abstract

Electrical discharges generated by switching electrical contacts or by disconnecting a plug under voltage (hot plugging) are an important source of ignition in potentially explosive atmospheres. For electrical components in such atmospheres, an ignition protection concept such as intrinsic safety "i" is required. Ignition is prevented by defining a limitation of electrical values. In accordance with current technological requirements, this limitation is tested using the IEC spark test apparatus by generating electrical discharges in an explosive gas mixture with the energy of the test component. Although the discharge types involve complex phenomena that are not yet completely understood, the results of the test equipment vary widely and can lead unfair competition. In order to achieve reproducible results, it is therefore necessary to develop an improved alternative test method.

To be effective, this method should ideally simulate the discharge relevant for the ignition. The aim is to use this test method to determine the ignition limit values as easily as possible and in such a way that the values can be reproduced. The approach designed to solve this problem is based on ignition limit values obtained using the IEC spark test apparatus at a defined ignition probability under worst-case conditions. For this purpose, a special contact device is used with which these discharges are deliberately generated under worst-case conditions.

The investigations presented here therefore include the determination of worst-case conditions and the characterization of discharges during opening processes in hydrogen/air mixtures with current values below 60 mA and a maximum voltage of 30 VDC. The current/voltage characteristic curve is presented together with the optical spectrum, an estimation of the temperature and a simplified evaluation of the ignition characteristics via the power curve, including an estimation of the measurement uncertainty.

The simulation is based on discharge physics, generates reproducible results and can be used in a device or a program. This work forms an initial basis for creating a test method that will serve as an alternative to the previous IEC spark test apparatus, and whose results can be used in international standardization.

# Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<b>Danksagung .....</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>II</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>III</b>
<b>1 Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>4</b>
2.1 Explosionsschutz durch die Zündschutzart Eigensicherheit .....	4
2.2 IEC-Funkenprüfgerät .....	5
2.3 Zündgrenzen von Stromkreisen .....	8
<b>3 Wissenschaftliche Grundlagen .....</b>	<b>10</b>
3.1 Elektrische Kontaktvorgänge .....	10
3.2 Metaldampfentladung und Plasma .....	12
3.3 Elektrische Zusammenhänge und Strom-Spannungs-Kennlinie .....	17
3.4 Zündung von Gas-Luft-Gemischen .....	21
<b>4 Problemstellung und Lösungsansatz .....</b>	<b>25</b>
<b>5 Experimenteller Aufbau und Messtechnik .....</b>	<b>32</b>
5.1 Versuchsaufbau .....	32
5.2 Kontaktvorrichtungen .....	34
5.3 Messunsicherheit .....	37
<b>6 Einflussgrößen auf die Worst-Case-Situation .....</b>	<b>39</b>
6.1 Kontaktöffnungsbewegung .....	40
6.2 Elektrodenoberflächen und Vorprozesse .....	47
6.3 Spannungsquelle mit Konstantstromregelung .....	52
<b>7 Charakterisierung der Entladung .....</b>	<b>53</b>
7.1 Strom-Spannungs-Kennlinie .....	53
7.2 Spektroskopische Untersuchungen .....	62
7.3 Temperaturabschätzung .....	64
7.4 Zündkriterien .....	68
7.5 Zündwahrscheinlichkeit und Häufigkeit der Zündung .....	74
<b>8 Zusammenfassung .....</b>	<b>76</b>
<b>9 Ausblick .....</b>	<b>79</b>

---

<b>Anhang .....</b>	<b>80</b>
<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>86</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>90</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>91</b>

# 1 Einführung

Elektrische Entladungen, die beim Öffnen oder Schließen von elektrischen Stromkreisen auftreten können, sind besonders in der Groß- und Petrochemie eine bedeutende Zündquelle in explosionsfähigen Atmosphären. In der Praxis können diese auch bei einem Drahtbruch oder beim Lösen einer Steckverbindung unter Last (hot plugging) auftreten. Beim Einsatz von elektrischen Komponenten in explosionsfähigen Atmosphären wie beispielsweise Sensoren oder Anzeigen in der chemischen Industrie (Tanks, Rohrleitungen etc.) werden Zündungen durch die Anwendung von elektrischen Schutzkonzepten wie die Zündschutzart Eigensicherheit „i“ verhindert. Diese ist in den internationalen Normen IEC 60079-11 [INT11] sowie IEC 60079-25 [INT10] dokumentiert. Beim Schutzkonzept Eigensicherheit werden u. a. die Ströme und Spannungen auf so geringe Werte begrenzt, dass statistisch bewertet in der Praxis keine zündfähigen Entladungen auftreten können. Ob eine elektrische Komponente geeignet ist, kann mit dem in der Norm IEC 60079-11 [INT11] dokumentierten IEC-Funkenprüfgerät geprüft werden. Die Grenzwerte der genannten Normen basieren ebenfalls auf dem IEC-Funkenprüfgerät.

Im IEC-Funkenprüfgerät werden mittels eines fortwährend schaltenden elektrischen Kontaktes Entladungen erzeugt, die mit der elektrischen Energie des zu testenden Gerätes gespeist werden. Dabei wird geprüft, ob die Entladungen das umgebende Gasgemisch entzünden können. Die Ergebnisse dieser Messmethode streuen stark und besitzen zudem eine schlechte Reproduzierbarkeit [THE02]. Ein Ringvergleichstest, der im Rahmen des International Proficiency Testing Program (PTP) von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) initiiert wurde, bestätigte diese Aussage [PHY12]. Dabei haben mehrere internationale Prüfstellen die Zündfähigkeit von gleichen Teststromkreisen mit dem IEC-Funkenprüfgerät beurteilt. Die Ergebnisse streuen erheblich, können jedoch durch die Verwendung einer großzügigen Reserve als sicherheitstechnisch unkritisch beurteilt werden. Dennoch ergeben sich üblicherweise bei komplexen Stromkreisen Wettbewerbsverzerrungen, da ein Prüfstromkreis von der einen Prüfstelle zugelassen und von der anderen Prüfstelle nicht zugelassen werden kann [KWK13].

Ein weiterer Nachteil des IEC-Funkenprüfgerätes ist die Verwendung von Cadmium als Kathode. Cadmium wird eingesetzt, da es zündfähige Entladungen mit geringsten Strom- und Spannungswerten ermöglicht. Jedoch ist Cadmium toxisch und in der Europäischen Union nur noch für Anwendungen zugelassen, bei denen keine Alternativen möglich sind [EUR11]. Als Alternative zu Cadmium werden von Zalogin [ZAL05] je nach Stromkreis Zink, Eisen und Magnesium untersucht und vorgeschlagen.

Das internationale Normungsgremium IEC TC31 WG4 strebt daher langfristig die Entwicklung einer alternativen Prüfmethode zum IEC-Funkenprüfgerät an. Für die Zukunft wird ein



nichtmechanisches Gerät ohne toxisches Cadmium und ohne Gasgemisch oder eine Simulation angestrebt.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz für eine Alternative zum IEC-Funkenprüfgerät bildet die relevanten Vorgänge in dieser Kontaktvorrichtung nach, wofür eine Charakterisierung der Entladungen an der Zündgrenze des Wasserstoff-Luftgemisches erforderlich ist. Die ersten Ergebnisse dienen als Grundlage für eine Simulation von Rajiv Shekhar in Zusammenarbeit mit der PTB [SBU17].

Über die Anwendung im Explosionsschutz hinaus können Untersuchungen einiger Teilvorgänge zum tieferen Verständnis beitragen, beispielsweise bei vergleichbaren Entladungen von Kontaktvorgängen in Mikrorelais. Ebenfalls stehen die Erkenntnisse dieser Arbeit für die allgemeine Normungsarbeit des Explosionsschutzes zur Verfügung.

Die Forschungsarbeiten über Entladungen orientieren sich stark an den jeweils aktuellen Anwendungen wie beispielsweise Schaltgeräte, Plasmaleuchten, Metallbearbeitung über Funkenerosion, Zersetzung von elektrischen Isolationen, Zündung in Verbrennungsmaschinen etc. [MIE73]. Entladungen an der Zündgrenze, die durch schaltende Kontakte in einem Wasserstoff-Luft-Gemisch erzeugt werden, sind ein außerordentlich komplexes Phänomen. Zusätzlich herausfordernd sind dabei die unterschiedlichen Zeitskalen (Nano-, Mikro- und Millisekunden) sowie die kleinen Abmessungen der Entladungen mit typischen Längen bis zu 200  $\mu\text{m}$ . Zündungen durch filigrane Kontaktbewegungen in zündfähigen Gas-Luft-Gemischen erfordern aufwendige Apparaturen und technische Infrastruktur. Solche Entladungen, die mit Stromwerten im Bereich kleiner als 60 mA und Spannungen unter 30 V erzeugt werden, wurden in der Vergangenheit in der hier erforderlichen wissenschaftlichen Tiefe nicht ausreichend behandelt. Mit den vorliegenden Untersuchungen wird neben der Darstellung des grundlegenden Ansatzes und der Charakteristiken auch ein Überblick über diese sehr interdisziplinäre Thematik in angemessener Tiefe angestrebt.

Die ausführliche Problemstellung sowie der Lösungsansatz ist in dieser Arbeit in einem eigenen Kapitel 4 nach dem Stand der Technik und den wissenschaftlichen Grundlagen dargestellt, da diese hierfür vorausgesetzt werden. Die Gliederung der Arbeit ist in der folgenden Abbildung 1.1 dargestellt.

Einführende Beschreibung	Motivation, Ziele, Struktur der Arbeit <span style="float: right;">Kapitel 1</span>	
	<div style="text-align: right;">Kapitel 2</div> Stand der Technik - Explosionsschutz - Eigensicherheit - Funkenprüfgerät - Zündgrenzkurven	<div style="text-align: right;">Kapitel 3</div> Wissenschaftliche Grundlagen - Elektrische Kontaktvorgänge - Entladung - Zündung
	Problemstellung und Lösungsansatz <span style="float: right;">Kapitel 4</span>	
	Experimenteller Aufbau <span style="float: right;">Kapitel 5</span>	
Untersuchungen und Ergebnisse	<div style="text-align: right;">Kapitel 6</div> Analyse der Bedingungen - Bewegungen - Oberflächen - Vorprozesse - Stromversorgung	<div style="text-align: right;">Kapitel 7</div> Charakteristiken der Entladung - Strom-Spannungs-Kennlinie - Spektrum, Temperatur - Zündkriterien - Häufigkeit der Zündung
	- Zusammenfassung <span style="float: right;">Kapitel 8</span> - Ausblick <span style="float: right;">Kapitel 9</span>	
Schluss		

**Abbildung 1.1:** Struktur der Arbeit

In der einführenden Beschreibung dieser Arbeit folgt die Darstellung der Problemstellung und des Lösungsansatzes nach dem Stand der Technik und den wissenschaftlichen Grundlagen. In den folgenden Kapiteln der einzelnen Untersuchungen werden die zugehörigen Ergebnisse beschrieben. Anschließend folgen im Schlussteil die Zusammenfassung und der Ausblick mit den sich ergebenden weiteren Forschungsfragen.

## 2 Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden relevante Grundlagen der Zündschutzart Eigensicherheit „i“ des Explosionsschutzes sowie die zugehörige Beurteilungsmethode von Stromkreisen erläutert. Tiefer gehende Grundlagen zum generellen Explosionsschutz und zu weiteren Zündschutzkonzepten sind in der Literatur [STE00], [BZ93], [BAR03], [MAG78] ausführlich dargestellt.

### 2.1 Explosionsschutz durch die Zündschutzart Eigensicherheit

Explosionen können ausgelöst werden, wenn ein Brennstoff, ein Oxidationsmittel und eine Zündquelle in geeigneter Kombination zusammenwirken. Als Brennstoff können Gase oder auch Stäube infrage kommen und als Oxidationsmittel wirkt in der Regel ein Luft-Sauerstoff-Gemisch [STE00].

Eine Möglichkeit eine Zündung in explosionsfähigen Atmosphären zu verhindern ist die Anwendung der Zündschutzart Eigensicherheit „i“. Dieses Zündschutzkonzept soll mit eigensicheren Stromkreisen bewirken, dass „[...] weder ein Funke noch ein thermischer Effekt [...] auftritt, die [...] eine Zündung einer bestimmten explosionsfähigen Atmosphäre verursachen [...]“ können, vgl. [DKE12]. So wird sichergestellt, dass in elektrischen Stromkreisen weder elektrische Entladungen noch Erwärmungen eine explosionsfähige Atmosphäre entzünden können.

Die Zündschutzart Eigensicherheit „i“ wird vorrangig in der industriellen Praxis bei elektrischen Betriebsmitteln angewendet, beispielsweise bei Sensoren und Anzeigen, die in der Regel mit Spannungen kleiner als 75 V und Strömen kleiner als 3 A betrieben werden. Die Anforderungen an einen eigensicheren Stromkreis sind in der Norm IEC 60079-11 [INT11] beschrieben. Die hier vorgegebenen Zündgrenzkurven basieren auf dem sogenannten IEC-Funkenprüfgerät. In dieser Norm sind Zündgrenzkurven für einfache kapazitive, induktive und ohmsche Stromkreise enthalten. Für komplexere Stromkreise muss die weitere Norm IEC 60079-25 [INT10] angewendet werden. Sofern bei der sicherheitstechnischen Beurteilung die in den Normen beschriebenen Anforderungen nicht ausreichen, wird auf das o. g. IEC-Funkenprüfgerät zurückgegriffen, welches im folgenden Kapitel 2.2 beschrieben wird.

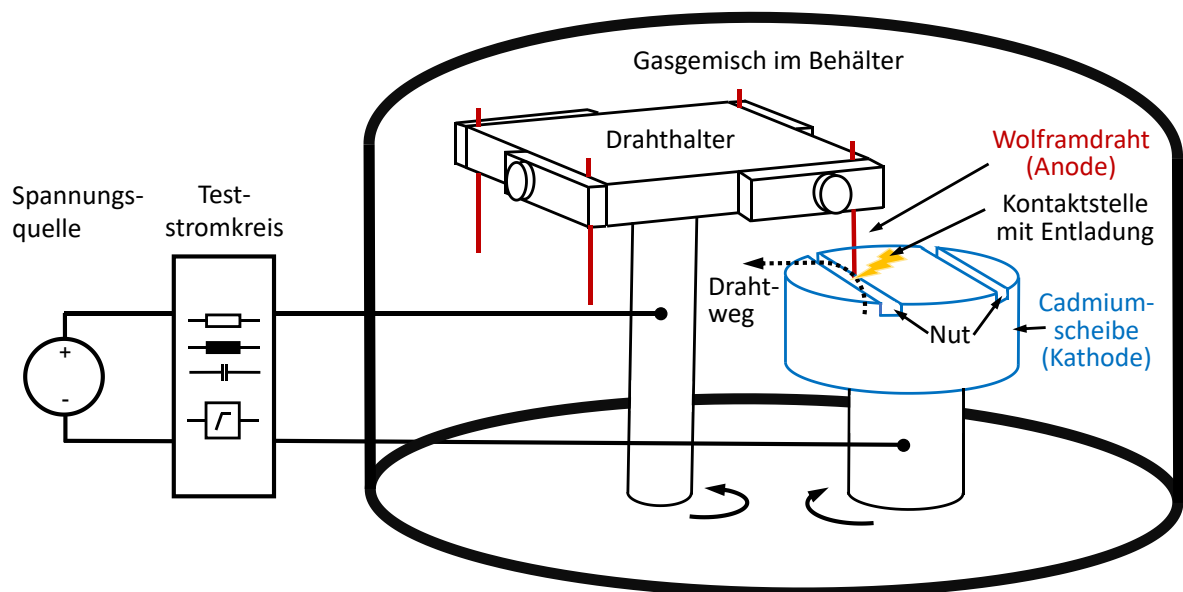
In der Zulassungspraxis wird ein sogenannter **Sicherheitsfaktor** verwendet. Die Bewertung eines elektrischen Betriebsmittels mit einem Sicherheitsfaktor größer als 1 führt zu geringeren zulässigen elektrischen Werten. Mit der durch diesen Faktor gegebenen Sicherheitsreserve werden unvorhergesehene Effekte auf die Zündfähigkeit und Streuungen bei den Prüfungen kompensiert. Der Sicherheitsfaktor wird durch das Schutzniveau und durch die Gefahrklasse, d. h. die Explosionszonen, bestimmt. Die Werte in den Versuchen dieser Arbeit basieren auf

dem Sicherheitsfaktor 1,0 und es wird das Gasgemisch der IEC-Gruppe IIC Wasserstoff-Luft-Gemisch  $\varphi(\text{H}_2) = 21 \%$  genutzt.

## 2.2 IEC-Funkenprüfgerät

Das IEC-Funkenprüfgerät wurde 1967 von der IEC als Standardprüfeinrichtung für eigensichere Geräte festgelegt, wobei die PTB wesentlich an der Entwicklung beteiligt war [VOG80]. Mit diesem Prüfgerät werden beispielsweise ein Drahtbruch oder das Ziehen eines Steckers unter Last in explosionsfähiger Atmosphäre nachgebildet.

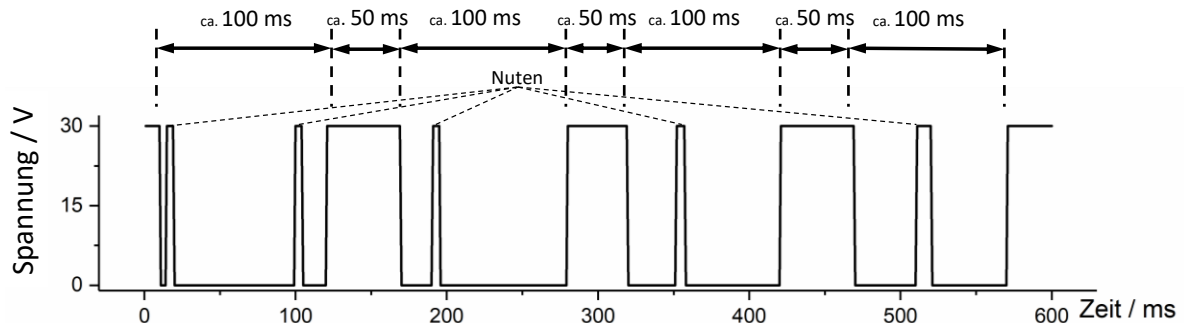
Die Kontaktvorrichtung des Funkenprüfgerätes besteht aus einem Drahthalter mit vier Wolfram-Drähten (Anode) sowie einer Cadmium-Scheibe (Kathode). Die Wolfram-Drähte sind 11 mm lang und besitzen einem Durchmesser von 200  $\mu\text{m}$ . Die Cadmium-Scheibe hat einen Durchmesser von 30 mm und auf der Oberseite befinden sich zwei Nuten mit einer Breite von 2 mm. Der Drahthalter dreht sich mit 80 Umdrehungen und die Cadmium-Scheibe gegenläufig mit 19,2 Umdrehungen in der Minute. Die Umfangsgeschwindigkeit des Drahtes im Drahthalter beträgt 0,21  $\text{m s}^{-1}$ . Eine explosionsdruckfeste Gefäßwandung mit einem Volumen von 250  $\text{cm}^3$  umschließt die Kontaktanordnung, um das Gasgemisch aufnehmen zu können. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Die genauen Abmessungen sind in der bereits genannten IEC 60079-11 [INT11] beschrieben.



**Abbildung 2.1:** Schematischer Aufbau des IEC-Funkenprüfgerätes mit Teststromkreis (links) entsprechend der Anlage B der Norm IEC 60079-11 [INT11]

Bei jeder Vierteldrehung des Drahthalters bewegt sich ein Draht für ca. 100 ms über die Scheibe, gefolgt von einem Zeitraum von ca. 50 ms, in dem sich kein Draht auf der Scheibe befindet. Bei diesem sich periodisch wiederholenden Vorgang werden durch die mechanische Koppelung des Drahthalters mit der Cadmium-Scheibe versetzte Kontaktwege genutzt, wobei

sich dies alle 25 Vorgänge mit einem anderen Draht wiederholt. Alle 100 Vorgänge bewegt sich dann derselbe Draht wieder über den gleichen Kontaktweg. Der zeitliche Verlauf der Kontaktvorgänge für eine Umdrehung des Drahthalters ist in Abbildung 2.2 über den Spannungsverlauf dargestellt.



**Abbildung 2.2:** Vereinfachter zeitlicher Verlauf der Kontaktvorgänge auf der Basis des Spannungsverlaufes zwischen dem Wolfram-Draht und der Cadmium-Scheibe

In diesem Verlauf (Abbildung 2.2) ist über die Spannungswerte von 0 V zu erkennen, dass sich der Draht für ca. 100 ms auf der Scheibe befindet (elektrischer Kontakt) und durch die Nut unterbrochen wird. In den weiteren ca. 50 ms besteht kein elektrischer Kontakt mit der Cadmium-Scheibe (30 V), wenn sich kein Draht auf der Scheibe befindet.<sup>1</sup> In der Praxis kommt es zusätzlich zu den Schließ- und Öffnungsvorgängen zu Prell- und Schwingbewegungen sowie schleifenden elektrischen Kontaktvorgängen [THE02]. Sofern ausreichend elektrische Energie zur Verfügung steht, treten dabei zahlreiche verschiedene elektrische Entladungen auf, von denen einzelne eine Zündung bewirken.

Gemäß der Norm muss der Draht die Kante der Cadmium-Scheibe um 1 mm überlappen [INT11]. In der Praxis beträgt die Überlappung ungefähr 0,7 bis 1,2 mm. Bei den unterschiedlichen Kontaktschließ- und -öffnungsvorgängen bewegt sich die Spitze des Wolfram-Drahtes in Bezug zur Oberfläche der Cadmium-Scheibe mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Bei der Bewegung über die Scheibe biegt sich der Draht elastisch. Wenn die Drahtspitze eine Kante erreicht, beschleunigt diese beim Entspannen bzw. Zurückbiegen des Drahtes auf sehr hohe Geschwindigkeiten von bis zu  $31,1 \text{ m s}^{-1}$  [ZAL06]. Wenn sich der Draht entlang der Kante in der Nut bewegt, ändert sich der Elektrodenabstand wesentlich langsamer. Auf weitere mechanische Zusammenhänge wird in Kapitel 6.1 eingegangen.

Für das Funkenprüfgerät sind als maximale Selbstinduktivität  $3 \mu\text{H}$  und als maximale Eigenkapazität  $30 \text{ pF}$  vorgegeben, jedoch gibt es keine Vorgaben für den gesamten Teststromkreis (vgl. Abbildung 2.1) mit dem Funkenprüfgerät [INT11].

<sup>1</sup> Die aus dem Spannungsverlauf resultierenden Zeiten sind kürzer als die Zeiten, die sich über theoretische Berechnungen ergeben. Die kürzeren Zeiten ergeben sich aus der Nutzung eines IEC-Funkenprüfgerätes mit einem schneller drehenden Drahthalter.

Vor dem Beginn einer Prüfmessung muss eine Empfindlichkeitsprüfung des IEC-Funkenprüfgerätes durchgeführt werden. Dabei wird geprüft, ob im IEC-Funkenprüfgerät mit einem Prüfgemisch (Wasserstoff-Luft-Gemisch  $\varphi(\text{H}_2) = 21\%$ ), einem vorgegebenen Stromkreis (Luftspule 95 mH), einer Gleichspannung von 24 V und einem Strom von 30 mA innerhalb von 440 Umdrehungen des Drahhalters eine Zündung auftritt. Sofern diese Empfindlichkeitsprüfung nicht erfolgreich war, muss eine **Vorkonditionierung** der Cadmium-Scheibe erfolgen, bei der das Funkenprüfgerät ohne Gemisch mit einem definierten Stromkreis für 20 000 Umdrehungen des Drahhalters betrieben wird [INT11]. Durch diese Maßnahme wird die Oberfläche mithilfe von Entladungen aktiviert und erzeugt beispielsweise eine raue Cadmium-Oberfläche (vgl. Kapitel 3.2). Bei den in dieser Arbeit vorgenommenen Experimenten erfolgte ebenfalls eine Vorkonditionierung, die in Kapitel 6.2 beschrieben ist.

Bei der Durchführung der Prüfmessung für die Beurteilung der Eigensicherheit nach IEC 60079-11 wird ein Prüfstromkreis mit 400 Umdrehungen des Drahhalters geprüft. Dieses entspricht einer Dauer von 5 Minuten. Sofern in dieser Zeit keine Zündung auftritt, gilt der Stromkreis als eigensicher [INT11].

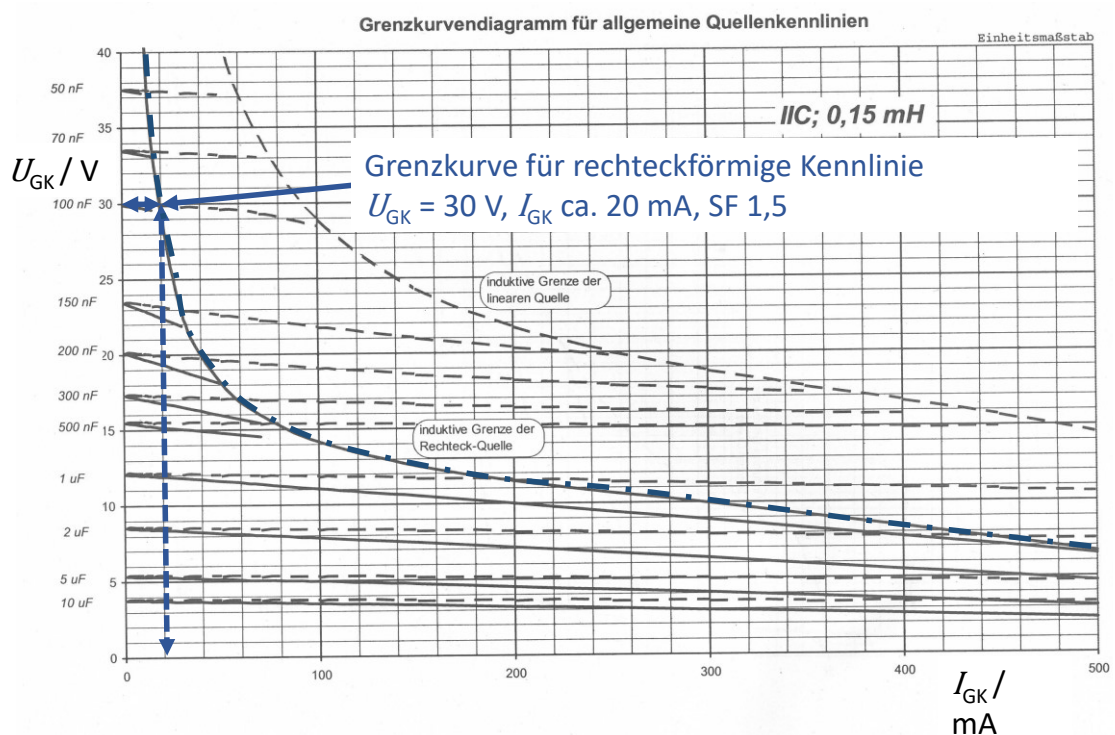
Die Zündgrenzwerte in der Norm basieren auf einer **Zündwahrscheinlichkeit** von  $Z = 10^{-3}$ , d. h., dass eine Entladung im statistischen Mittel erst nach 1 000 Kontaktvorgängen zündet (vgl. Gleichung (1)).

$$Z = \frac{1}{\text{Kontaktvorgänge bis zu einer Zündung}} \quad (1)$$

Anzumerken ist, dass ein sogenannter Kontaktvorgang der Zündwahrscheinlichkeit in der Norm als eine Viertelumdrehung des Drahhalters im Funkenprüfgerät definiert ist. D. h., bei einer vollständigen Umdrehung des Drahhalters treten genau vier zählbare Kontaktvorgänge bei einer unbekannten Anzahl von Entladungen auf. Somit stellt die hier verwendete Zündwahrscheinlichkeit  $Z$  nicht die in der klassischen mathematischen Wahrscheinlichkeitsbetrachtung genutzte relative Häufigkeit des Auftretens eines Ereignisses dar. Weil die Anzahl der Entladungen unbekannt ist, bezieht man sich im Explosionsschutz auf die Anzahl der Kontaktvorgänge [INT11]. In der Praxis werden für jeden Prüfstromkreis 15 Zündversuche durchgeführt und aus der Zeit bzw. der Anzahl der Kontaktvorgänge bis zur Zündung wird der arithmetische Mittelwert gebildet. Für die Aufnahme einer Zündgrenzkurve wird je Messpunkt mit der höchsten Spannung begonnen und diese dann kontinuierlich verringert [THE02], [Joh84], [GW99]. Auf die Bewertung eines Stromkreises mit einer Zündgrenzkurve wird im folgenden Abschnitt 2.3 eingegangen.

## 2.3 Zündgrenzen von Stromkreisen

Eine Prüfung mit dem IEC-Funkenprüfgerät kann durch die Anwendung von Zündgrenzkurven ersetzt werden, sofern Zündgrenzkurven für den Prüfstromkreis in der Norm enthalten sind. Die Zündgrenzkurven basieren auf Messungen mit dem IEC-Funkenprüfgerät. Für den in dieser Arbeit untersuchten Stromkreis ist eine Ermittlung der Zündgrenze über die Norm IEC 60079-25 [INT10] bzw. den PTB-Bericht PTB-ThEx-10 [JK99] möglich, welche die Bewertung zusammengeschalteter linearer und nicht linearer Stromkreise behandeln. In diesen Dokumenten wird eine grafische Methode zur Bewertung von Quellen mit linearen, trapezförmigen und rechteckförmigen Kennlinien beschrieben, die über Grenzkurvendiagramme für verschiedene höchstzulässige Induktivitäten (0,15 mH bis 5 mH) und Gasgruppen (IIB und IIC) eine Beurteilung ermöglicht. Für die in dieser Arbeit genutzte Konstantstromregelung mit Maximalspannungsbegrenzung (rechteckförmige Kennlinie) kann eine Bewertung über das Grenzkurvendiagramm mit induktiver Grenze der Rechteckquellen für die Gasgruppe IIC und einer höchstzulässigen Induktivität von maximal 0,15 mH erfolgen [JK99] (vgl. Abbildung 2.3).



**Abbildung 2.3:** Grenzkurvendiagramm für Schaltungen mit rechteckförmiger Kennlinie mit höchstzulässiger Induktivität von 0,15 mH einschl. Beispiel, vgl. PTB-Bericht Th-Ex-10 [JK99]

Die Grenzkurve in Abbildung 2.3 ist im genannten PTB-Bericht Th-Ex-10 aufgeführt und ebenfalls in der Norm IEC 60079-25 [INT10] enthalten. Mit diesem Diagramm ergibt sich beispielsweise für eine Spannung von  $U_{GK} = 30 \text{ V}$  ein max. zulässiger Strom von ca.  $I_{GK} = 20 \text{ mA}$ , wobei sich dieser Wert auf einen Sicherheitsfaktor von  $SF = 1,5$  bezieht. Daraus

lässt sich auf einen Strom von 30 mA für einen Sicherheitsfaktor 1 schließen, dem eine Zündwahrscheinlichkeit von  $10^{-3}$  zugeordnet wird.

In der industriellen Prüfpraxis wird auch eine Berechnungssoftware auf der Basis einer sehr vereinfachten mathematischen Methode eingesetzt. Diese bildet und extrapoliert bekannte Zündgrenzwerte der Norm für konkrete Stromkreise nach [KRÄ03].

Eine weitere Beurteilungsmethode ist die Ermittlung der elektrischen Zündgrenze für Kontaktschließvorgänge über die sogenannte „**Nettoleistung**“ der Entladung. Die „Nettoleistung“ stellt den Anteil der zugeführten elektrischen Leistung dar, die dem Gasgemisch für die Zündung zur Verfügung steht. Bei der Berechnung wird dafür die sogenannte Verlustspannung  $U_V = 11 \text{ V}$  angewendet, um beispielsweise Elektrodenverluste zu berücksichtigen. Diese Entladungen bei Kontaktschließvorgängen haben eine typische Dauer von 1 bis 3  $\mu\text{s}$  und finden bei einem geschätzten Elektrodenabstand von 60  $\mu\text{m}$  statt [Joh84]. Bei einer Messung mit dem Funkenprüfgerät kann diese Leistung über die Spannungs- und Stromverläufe aus dem Oszillogramm ermittelt werden. Für die Bewertung wird nun der Zündgrenzwert der sogenannten „Nettoleistung“ von ca. 500 mW gemäß Johannsmeyer et. al. [JGU10] genutzt. Dieser Wert bezieht sich auf einen Sicherheitsfaktor von 1,0 (Zündwahrscheinlichkeit  $1 \cdot 10^{-3}$ ) und ist über die Zündgrenzkurven von resistiven Stromkreisen, d. h. bei Kontaktöffnungsvorgängen, ermittelt (vgl. Gleichung (2)). Solche Entladungen dauern mehrere 100  $\mu\text{s}$  an, woraus auf einen großen variierenden Elektrodenabstand (größer als die o.g. 60  $\mu\text{m}$ ) zu schließen ist [JGU10].

$$P_{n,max}(t) = \frac{(U_E(t) - U_V)^2}{4 \cdot R(t)} \quad (2)$$

Gleichung (2) stellt die maximale Leistung bei der Leistungsanpassung dar. Diese maximale „Nettoleistung“  $P_{n,max}$  ermittelt sich aus der Spannung  $U_E(t)$  abzüglich der Verlustspannung  $U_V$  und dem Widerstandswert  $R(t)$  der Entladung. Eine Mindestzeitdauer für eine Zündung, für die diese Leistung erforderlich ist, ist nicht angegeben. Auf diesen Ansatz wird in Abschnitt 3.4 Bezug genommen.



### 3 Wissenschaftliche Grundlagen

Bei der Zündung eines Gas-Luft-Gemisches durch Entladungen bei elektrischen Kontaktöffnungsvorgängen findet eine Vielzahl von Vorgängen und Wechselwirkungen statt. Johannsmeyer [Joh84] untersucht zündfähige Entladungen von schließenden elektrischen Kontakten im Funkenprüfgerät und entwickelt ein vereinfachtes Modell für die wirksame Zündenergie. Zündkriterien im Funkenprüfgerät werden von Zborovszky und Cotugno [ZC74] analysiert und beschrieben. Vogt [VOG80] und Faerstein [FAE86] befassten sich mit Entladungen in Methan mit dem IEC-Funkenprüfgerät. Die Zündgrenzen bei höheren Temperaturen und Drücken im Funkenprüfgerät sind bei Thedens [THE02] zu finden.

Die Phänomene von zündfähigen elektrischen Entladungen von Kontaktöffnungen im Funkenprüfgerät im hier betrachteten Spannungsbereich ( $< 30\text{ V}$ ) sind in umfassender Form und Tiefe bisher nicht untersucht worden, da die heutigen messtechnischen Voraussetzungen bislang nicht gegeben waren.

Die dafür relevanten Grundlagen von elektrischen Kontaktvorgängen, Metalldampfentladungen sowie der Zündung von Wasserstoff-Luft-Gemischen werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Die Grundlagen zu den Metalldampfentladungen werden hinsichtlich der spektroskopischen Analyse mit plasmaphysikalischen Grundlagen ergänzt.

#### 3.1 Elektrische Kontaktvorgänge

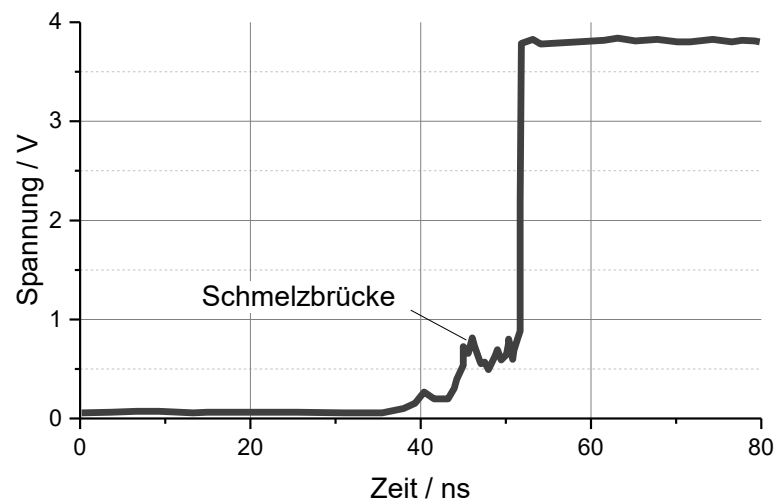
Die bei schaltenden Kontakten auftretenden Erscheinungen hängen von einer Reihe von Einflüssen, wie der Art des Vorgangs (Schließen oder Öffnen), der elektrischen Last, den Elektrodenmaterialien und -charakteristiken etc. ab [VIN16], [HOL67], [ES74], [SLA14], [SLA08].

Die Oberflächen von elektrischen Kontakten bzw. Elektroden sind im physikalischen Sinne stets rau und die gegenseitige Berührung basiert auf mikroskopisch kleinen tatsächlichen Berührungsflächen. Dann steht als wirksame Kontaktfläche für den Stromfluss nur ein Teil der Oberfläche eines Kontaktes zur Verfügung. Dazu können die Berührungsflächen mit Fremdschichten überzogen sein. In der Praxis wirken auf den Kontaktwiderstand zusätzlich viele weitere Einflüsse wie Partikel, Staub etc. [VIN16].

Insbesondere können auf Elektrodenoberflächen von Cadmium Whisker wachsen, die über unterschiedlichste Mechanismen entstehen können. Diese Haarkristalle können sich beispielsweise aus einer Metalldampfphase bilden oder aus dem Material heraus entstehen. Das erfolgt vorzugsweise an Gefügegrenzen aufgrund großer mechanischer Spannungen [LEV70]. Whisker speziell aus Cadmium sind von Panashchenko [PAN12] untersucht worden.

Bei gleitenden Kontakten reiben diese aufeinander und das weichere Material kann sich plastisch verformen sowie verschleifen. Dabei können Ansammlungen von Oxidpartikeln auftreten [BEH10], [VIN16]. Zborovszky und Cotugno [ZC74] ermitteln auf der Oberfläche der Cadmium-Scheibe  $\text{CdO}$  (braune Farbe),  $\text{WO}_2$  (braune Farbe),  $\text{WO}_3$  (gelbe Farbe) und Wolframdampf (schwarze Farbe). Dadurch verändern sich beim Gleiten kontinuierlich die Oberfläche und somit auch der Kontaktwiderstand [VIN16], [SE69].

Bei einer Kontaktöffnung kommt es nicht sofort zu einer galvanischen Trennung. Am Anfang reduzieren sich die wirksamen Kontaktflächen und die lokal auftretenden Stromdichten erhöhen sich so, dass die Temperatur bis zum Schmelzpunkt des Kontaktmaterials zunehmen kann [SLA14]. Die Kontaktspannung bei einer Schmelztemperatur von Cadmium mit 594 K ergibt sich gemäß Wakatsuki [WHO08] zu 160 mV und ist im Vergleich zu weiteren Metallen sehr niedrig (vgl. Anhang B).



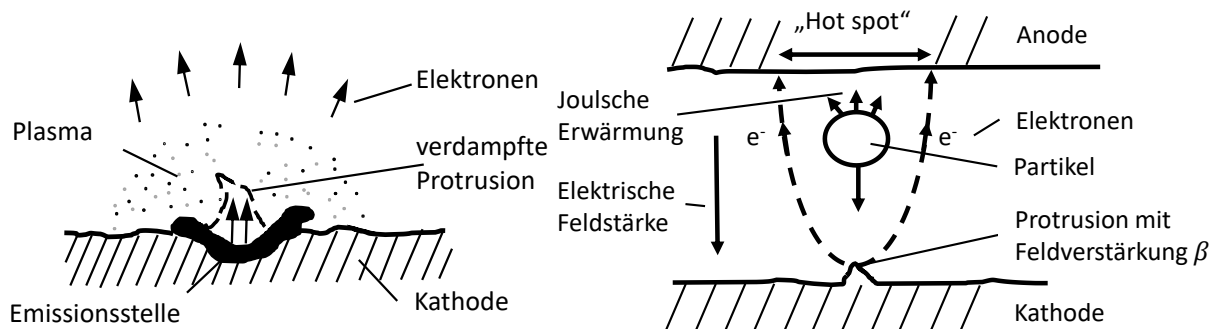
**Abbildung 3.1:** Beispiel eines Spannungsverlaufes mit einer Schmelzbrücke, Au-Kontakte mit 10 mA und 4 V, nach [SLA14].

Abbildung 3.1 zeigt einen typischen Spannungsverlauf bei einer Schmelzbrücke, vgl. [SLA14]. Der Stromfluss wird dann durch Metallschmelzbrücken aufrechterhalten (Spannungsbereich 0,5 – 1 V). Erhöht sich die Temperatur bis zur Verdampfungstemperatur, kommt es zur Verdampfung und die Brücke zerbricht. Bei einer Verdampfung von Cadmium mit einer Siedetemperatur von 1038 K beträgt die Kontaktspannung 317 mV gemäß Slade [SLA14] und ist im Vergleich zu anderen Materialien recht niedrig (vgl. Anhang B). Bei hohen Stromdichten verdampft die Schmelzbrücke explosionsartig. Danach kann eine elektrische Entladung bei kleinen Abständen in der Form eines Metaldampfbogens beginnen.

### 3.2 Metaldampfentladung und Plasma

Bei kleinen Elektrodenabständen sind Entladungen in Luft von Metaldampf dominiert [BJE87], [SLA08]. Metaldampfbögen werden in der Literatur zusammen mit dem Vakuumbogen beschrieben, da bei beiden Entladungsformen verdampftes und ionisiertes Elektrodenmaterial im Plasma wesentlich ist [LAT95]. Aufgrund der verbreiteten Anwendung, beispielsweise in der Hochspannungstechnik in Vakuumschaltern, wird in der Literatur jedoch überwiegend die Physik dieser Entladungen in einem wesentlich höheren Spannungs- und Strombereich behandelt. Grundlegende Informationen zu den Vorgängen bei Metaldampfentladungen sind in sehr umfänglichen Werken beschrieben [LIP03], [LAT95], [BSM95], [SLA14], [SLA08], [RIE67], [VIN16], [MP89]. Die Entladung stellt ein außerordentlich komplexes Phänomen dar, besonders dann, wenn ein Übergang von einem nicht-thermischen zu einem thermischen Plasma erfolgt. Im Folgenden werden daher mögliche Eigenschaften von Vakuumentladungen angeführt, deren Übertragbarkeit auf die Entladungen im Funkenprüfgerät noch Gegenstand der Forschung ist.

Der Metaldampf zwischen den Elektroden kann u. a. durch eine Schmelzbrücke (vgl. Abschnitt 3.1), durch eine explosionsfähig verdampfende Protrusion (Mikrospitze) auf der Oberfläche oder durch ein Partikel entstehen (vgl. Abbildung 3.2).



**Abbildung 3.2:** Links: Schematische Darstellung der explosionsartigen Emission des Plasmas aus einer Mikro-Protrusion, vgl. [MP89]; rechts: schematische Darstellung eines erhitzten Anodenpartikels, abgelöst von einer länglichen Protrusion, vgl. [DB71], [LAT95].

Bei der Bildung des Plasmas finden verschiedene Mechanismen statt. Im Allgemeinen tritt bei kleinen Elektrodenabständen nach Fowler und Nordheim an der rauen Oberfläche eine Feldemission auf, bei der aufgrund der hohen elektrischen Feldstärke, der Feldverstärkung und eines Tunneleffektes Elektronen aus der Oberfläche austreten [VIN16]. Bei dem Modell von Litvinov [LIT88] entsteht das Plasma aufgrund hoher Stromdichte in der Protrusion. Dabei schmilzt die Erhebung auf und dehnt sich durch den Druck explosionsartig aus (vgl. Abbildung 3.2, links). Bei einer größeren Stromdichte kann auch Thermoemission einsetzen, bei der heiße Elektronen nach dem Richardson-Gesetz aus der Kathode austreten [LIP03].

Sofern Metallspitzen an der Kathode aufgrund hoher Stromdichten verdampfen oder die Schmelztemperatur an der Anode erreicht wird, wird Metalldampf freigesetzt [SLA08].

Davies [DB71] beschreibt einen Durchschlag durch die Ablösung und Verdampfung von positiv geladenen Partikeln aus Kupfer von der Anode (ca. 1  $\mu\text{m}$  Durchmesser) in einem elektrischen Feld zwischen sich bewegenden Elektroden. Während des Transportes verdampft das Partikel durch Elektronenbeschuss (Elektronen  $e^-$ ) aus der Protrusion mit der elektrischen Feldverstärkung  $\beta$ . Dadurch werden eine joulesche Erwärmung  $J$  und die Aufheizung des Anoden-„Hotspots“ erzeugt [DB71] (vgl. Abbildung 3.2, rechts). Hierbei werden längliche Protrusionen durch Elektronenbeschuss der Feldstärkeemission erhitzt und lösen sich durch die Kraftwirkung des elektrischen Feldes an der Einschnürung. Durch den weiteren Elektronenbeschuss verdampft das Partikel und wird ionisiert. Metalldampf kann auch durch Mikrokanäle in der Oxidschicht der Oberfläche erzeugt werden [LAT95].

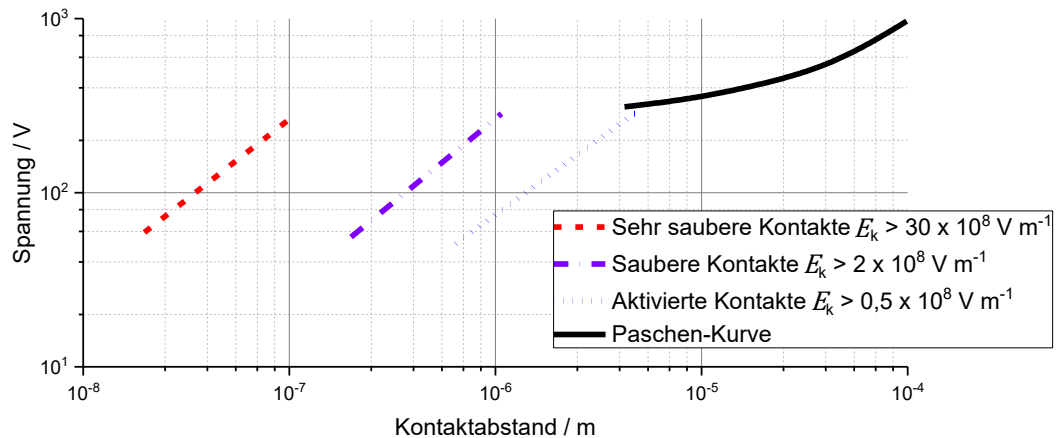
Je nach Modellvorstellung werden durch eine hohe Stromdichte in einem Kathodenfleck oder von anderen Emissionszentren auf der Kathode weitere Metalldampfatomte aus der Oberfläche beschleunigt. Die Metalldampfatomte werden durch Elektronenbeschuss im Feld ionisiert, neutralisieren nach der Rekombination wieder und kondensieren an den Elektroden. Die Ionisierung des Metalldampfes führt zu einem Durchschlag und das Plasma wird elektrisch leitend [LIP03].

Bei Elektrodenabständen kleiner als 0,3 mm ist die Durchschlagsspannung eine lineare Funktion des Kontaktabstandes und kleiner als die Werte der Paschenkurve [SLA14].

$$U_D = \frac{E_k \cdot d}{\beta} \quad (3)$$

Gleichung (3) zeigt die Abhängigkeit der Durchschlagsspannung  $U_D$  von der kritischen Durchschlagfeldstärke  $E_k$  für das jeweilige Kathodenmaterial, dem Elektrodenabstand  $d$ , der maßgeblichen Feldverstärkung  $\beta$  durch die Geometrie sowie der mikroskopischen Feldverstärkung durch die Rauheit [SLA14]. Mikropartikel führen ebenfalls zu Feldverstärkungen [BEY92]. Als Elektrodenabstand für Vakuumdurchbrüche wird die 5 bis 10-fache freie Weglänge mit  $d = 10^{-5} \text{ m}$  angegeben. Bei Go [GV14] werden Vakuumdurchbrüche bei Elektrodenabständen für  $< 10 \mu\text{m}$  beschrieben und mit einer modifizierten Paschenkurve dargestellt.

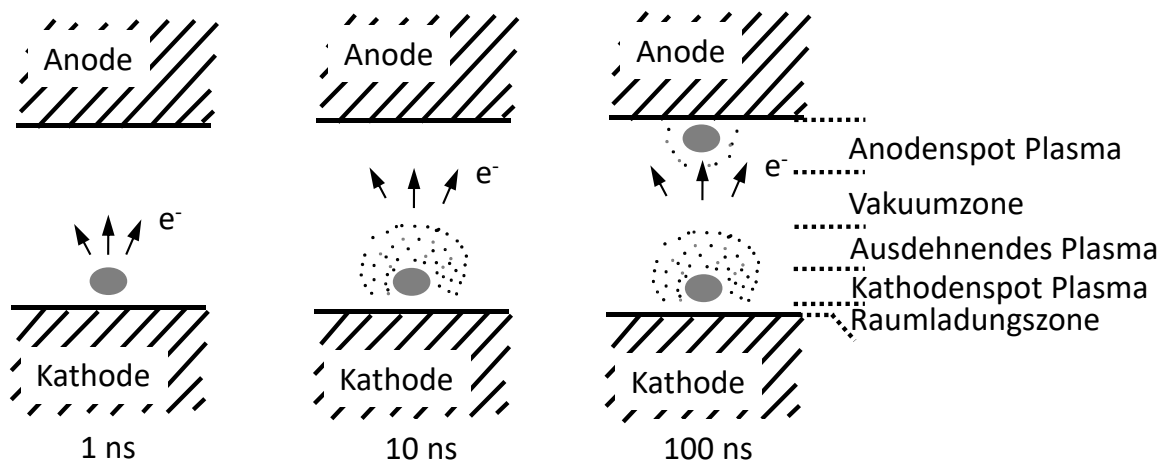
Abbildung 3.3 zeigt ein Beispiel für die verschiedenen Durchschlagsspannungen und Kontaktabstände bei Palladiumkontakten mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit. Die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit kann durch Aktivierung der Oberfläche mithilfe mechanischer und elektrischer Beanspruchung erzeugt werden.



**Abbildung 3.3:** Abbildung der erforderlichen Durchschlagspannung bzw. Feldstärke für unterschiedliche Elektrodenoberflächen von Palladiumelektroden in Vakuum, vgl. [WAG71] bzw. [SLA14]

Dabei werden für organisch verunreinigte und aktivierte Palladium-Kontakte in Luft mit  $E_k > 0,5 \times 10^8 \text{ V m}^{-1}$  geringere erforderliche elektrische Feldstärken für einen Durchschlag als für saubere Kontakte mit  $E_k > 2 \times 10^8 \text{ V m}^{-1}$  und sehr saubere Kontakte mit  $E_k > 30 \times 10^8 \text{ V m}^{-1}$  ermittelt [WAG71].

Die Entladung kann dann zwei Spots ausbilden (vgl. Abbildung 3.4).



**Abbildung 3.4:** Entladungszonen beim Durchschlag einer Vakuumentladung, vgl. [JÜT88]

Die Vakuumentladung ist durch den Anodenspot, die Vakuumentladung, ausdehnendes Plasma, den Kathodenspot sowie die Raumladungszone gekennzeichnet. Abbildung 3.4 zeigt die zeitliche Entwicklung dieser Entladung [JÜT88].

Es wird zwischen Plasmen im **vollständigen thermodynamischen Gleichgewicht** (VTG, engl. CTE: complete thermodynamic equilibrium), Plasmen im lokalen thermodynamischen Gleichgewicht (LTG, engl. LTE: local thermodynamic equilibrium) und **nichtthermischem Plasma** (NTP, engl. NTP: Non-thermal Plasma) unterschieden. Die Anregungs-, Elektronen-, Ionen-, Translations-, Rotations-, Vibrations- und Gastemperatur erlaubt eine Charakterisierung des Plasmas mit makroskopischen Größen. Diese sind im Gleichgewichts-

zustand für alle Spezies gleich [BRO02], [RB92]. Die Temperatur ist ein Maß für die kinetische Energie der einzelnen Spezies und über die Boltzmann-Konstante mit dieser verknüpft. Steigt jedoch beispielsweise durch ein elektrisches Feld der Anteil hochenergetischer Elektronen und ist keine ausreichende Wärmekopplung vorhanden, haben die Teilchen unterschiedliche Temperaturen bzw. Energien [GRI97], [BOU94]. Dann befindet sich das Plasma im Ungleichgewicht, was auch als Plasma im nichtthermischen Gleichgewicht oder als kaltes Plasma bezeichnet wird [RD84].

In Tabelle 1 sind Temperaturen und Angaben zum Gleichgewichtszustand für verschiedene Beispiele von Entladungsformen dargestellt.

**Tabelle 1:** Temperaturen von verschiedenen Entladungsformen, nach [BRO02]

Entladung	Temperatur / K				
	$T_{Rotation}$	$T_{Anregung}$	$T_{Elektronen}$	$T_{Ionisation}$	
Bogen	5.000	5.000	5.400	5.000	LTE
Funken <sup>2</sup>		20.000	20.000	20.000	LTE
Induktiv gekoppeltes Plasma	4.800	5.000	6.000	6.000	≈ LTE
Magnetisch induziertes Plasma	2.000	4.000	6.000	6.000	kein LTE
Glimmentladung	600	20.000	30.000	30.000	kein LTE

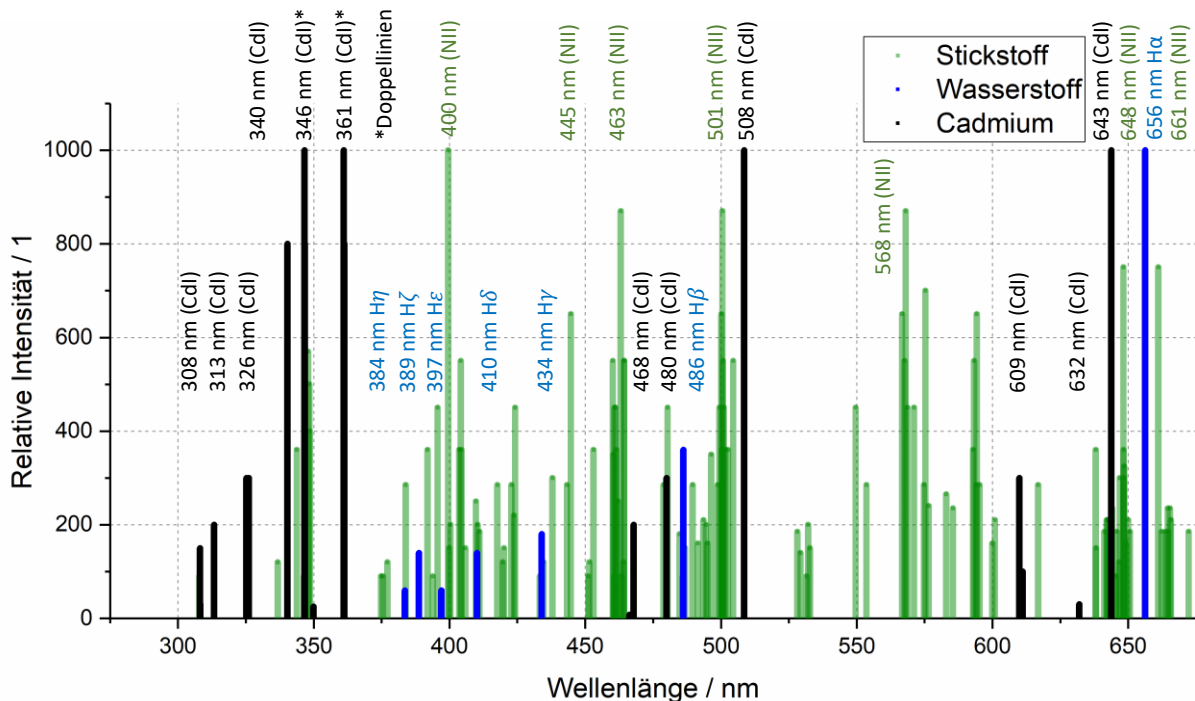
In Tabelle 1 sind Beispiele für Plasmen im Gleichgewicht (LTE) mit annähernd gleichen Temperaturen (Rotationstemperatur  $T_{Rotation}$ , Anregungstemperatur  $T_{Anregung}$ , Elektronentemperatur  $T_{Elektronen}$ , Ionisierungstemperatur  $T_{Ionisation}$ ) im Unterschied zu Plasmen im Nichtgleichgewicht (kein LTE) mit größeren Temperaturunterschieden aufgeführt. Auf die Wirkung von Plasmen im Nichtgleichgewicht auf den Zündprozess wird im Kapitel 3.4 eingegangen.

Die emittierte Strahlung von Plasmen kann sich aus Bremsstrahlung, Rekombinationsstrahlung und Strahlung aus Energieübergängen im Atom zusammensetzen. Bremsstrahlung und Rekombinationsstrahlung besitzen ein kontinuierliches Spektrum, sind aber für die in dieser Arbeit durchgeführte Analyse nicht von Bedeutung. Die Strahlung von Energieübergängen ergibt ein Linienspektrum. Diese Strahlung basiert auf der Zufuhr von Energie und wird generell mit ansteigender Temperatur intensiver. Bei der Zufuhr von Energie werden Elektronen auf eine höhere Elektronenbahn bzw. ein höheres Energieniveau des

<sup>2</sup> Als Funkenentladung werden in der Physik Entladungen mit einem Übergang von einer in eine andere Entladungsform definiert [VIN16], bzw. kurzzeitige Gasentladungen, die von selbst erlöschen [MS05]. Diese Definition steht im Widerspruch zur Bezeichnung IEC-Funkenprüfgerät, da die Dauer der Entladung hier im Wesentlichen durch die Änderung des Elektrodenabstandes bestimmt wird.

Atoms gehoben. Die Strahlung wird emittiert, wenn die Elektronen wieder auf ein energetisch niedrigeres Niveau zurückfallen und die Energie erneut frei wird. Die Elektronen können hierbei nur die diskreten Energieniveaus annehmen, die durch die Elektronenkonfiguration des angeregten Elementes gegeben und eindeutig sind. Die Differenz der Energieniveaus bestimmt die Wellenlänge der emittierten Strahlung und lässt sich über das Gesetz nach Planck berechnen [RAI03].

Somit kann über die Wellenlängen der emittierten Strahlung ein Element eindeutig zugeordnet werden [GRI97]. In der folgenden Abbildung sind die charakteristischen Spektren relevanter Elemente als mögliche Quellen für die Strahlung der Entladung in dieser Arbeit angegeben.



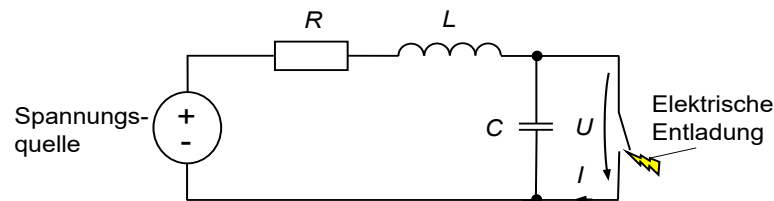
**Abbildung 3.5:** Ausgewählte Spektrallinien von Stickstoff (grün), Wasserstoff (hellblau) und Cadmium (schwarz) aus der ASD (Nist), vgl. [KRA18]

In Abbildung 3.5 sind die Spektrallinien der Elemente mit den relativen Intensitäten dargestellt, die auf den maximalen Wert des jeweiligen Elementes normiert sind. Es sind die markanten Spektrallinien im sichtbaren Bereich von Stickstoff (grün) und für Wasserstoff (hellblau) mit den Linien der Balmer-Serie von H $\alpha$  bis H $\eta$  und von Cadmium (schwarz) aufgeführt. Das Termschema von Cadmium ist in Gobrecht [GOB75] und das von Wasserstoff in Raith [RAI03] zu finden.

Für eine ingenieurtechnische Beschreibung der plasmaphysikalischen Vorgänge bei einer Entladung wird diese mit einem Ersatzschaltbild sowie als von außen elektrisch messbare Größe in Strom-Spannungs-Kennlinien dargestellt.

### 3.3 Elektrische Zusammenhänge und Strom-Spannungs-Kennlinie

Die Prozesse der elektrischen Entladungen werden wesentlich von den Kontaktvorgängen wie Schließ- und Öffnungsvorgängen und den Kreisparametern bestimmt. In dieser Arbeit wird im Folgenden auf Entladungen in Gleichstromkreisen mit kleinen Lasten eingegangen. Dafür wird folgendes Ersatzschaltbild genutzt (vgl. Abbildung 3.6).



**Abbildung 3.6:** Ersatzschaltbild für die vereinfachten Zusammenhänge der elektrischen Kreisparameter und einer Entladung, vgl. [BAR03]

Das Ersatzschaltbild zeigt die vereinfachten Stromkreiskomponenten und den schaltenden Kontakt. Daneben können in der Praxis auch Induktivitäten und Kapazitäten von Leitungen und des Kontaktes zu den Ersatzkomponenten beitragen. Die elektrischen Entladungen werden bei Kontaktvorgängen maßgeblich durch die zur Verfügung stehende elektrische Energie aus den Stromkreisen bestimmt [BOR57]. Die durch die Stromkreiskomponenten für eine Entladung zur Verfügung gestellte Energie berechnet sich bei schließenden Kontakten über die in der Kapazität gespeicherte Energie, bei öffnenden Kontakten über die gespeicherte magnetische Energie der Induktivität und bei resistiven Stromkreisen über die maximale Leistung bei Leistungsanpassung [THE02]. In der Praxis sind in der Regel gemischte Schaltungen zu finden, bei denen die kapazitiven, induktiven und resistiven Stromkreiskomponenten zusammenwirken. Gleichungen und Herleitungen für RLC-Stromkreise sind beispielsweise bei Zborovski und Cotugno [ZC74] zu finden.

Die elektrischen Zusammenhänge von Entladungen zwischen der Spannung, dem Strom und der Entladungslänge werden mithilfe von quasistationären Strom-Spannungs-Kennlinien (auch Lichtbogengrenzkurven) empirisch ermittelt und beschrieben. In vielen Veröffentlichungen wird bei der Verwendung solcher Kennlinien nicht eindeutig angegeben, ob der Elektrodenabstand oder die Entladungslänge als Parameter verwendet wird, obwohl relevante Unterschiede bestehen. Da der Elektrodenabstand einfacher zu messen ist, wird häufig dieser verwendet, obwohl die Entladungslänge für die Charakterisierung der Entladung relevant ist [AGS10]. Um dynamische Einflüsse auf die Entladungen, beispielsweise die Wirkung von Temperatur- oder Längenänderungen auf die elektrische Leitfähigkeit, zu berücksichtigen, sind für jede Kennlinie die Angaben weiterer Parameter wie Öffnungsgeschwindigkeit, Elektrodengeometrie, Materialzusammensetzung und Medien zwischen den Elektroden wesentlich [AGS10].

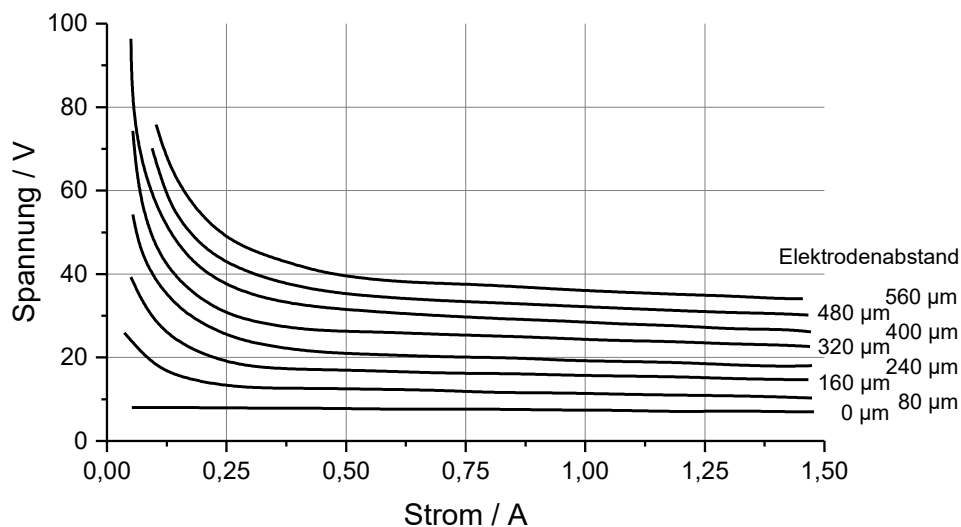


Die erste bekannte Gleichung für diese Kennlinien wurde von Ayrton formuliert [AYR02]. Die empirisch gefundene Beziehung für statische Lichtbögen (vergleiche Gleichung (4)) wurde von verschiedenen Autoren weiterentwickelt und diskutiert. Für die Konstanten wurden dabei Werte angegeben, die sich teilweise erheblich unterscheiden [NOT23], [RIE67], [ES74], [SO91].

$$U_E = a^A + b^A \cdot l_E + \frac{c^A + d^A \cdot l_E}{I_E} \quad (4)$$

Gleichung (4) ist die aus Rieder [RIE67] entnommene Version und gibt die Beziehung zwischen der Spannung der Entladung  $U_E$  und der Länge der Entladung  $l_E$  sowie dem Strom  $I_E$  der Entladung an. Der Parameter  $a^A$  entspricht der Summe der Anoden- und Kathodenfallspannung,  $b^A$  der Feldstärke zwischen den Kontakten. Die Summe  $c^A + d^A \cdot l_E$  kann als stromunabhängiger Leistungsanteil interpretiert werden [STR13].

Kennlinien mit Cadmium als Elektrodenmaterial für Entladungen in Luft bzw. Methan, die den Untersuchungen in dieser Arbeit ähnlich bzw. am nächsten sind, sind von Zborovszky und Cotugno [ZC74] mit den Daten von Holm [HOL67] erstellt sowie von Faerstein [FAE86] gemessen (vgl. Abbildung 3.7).

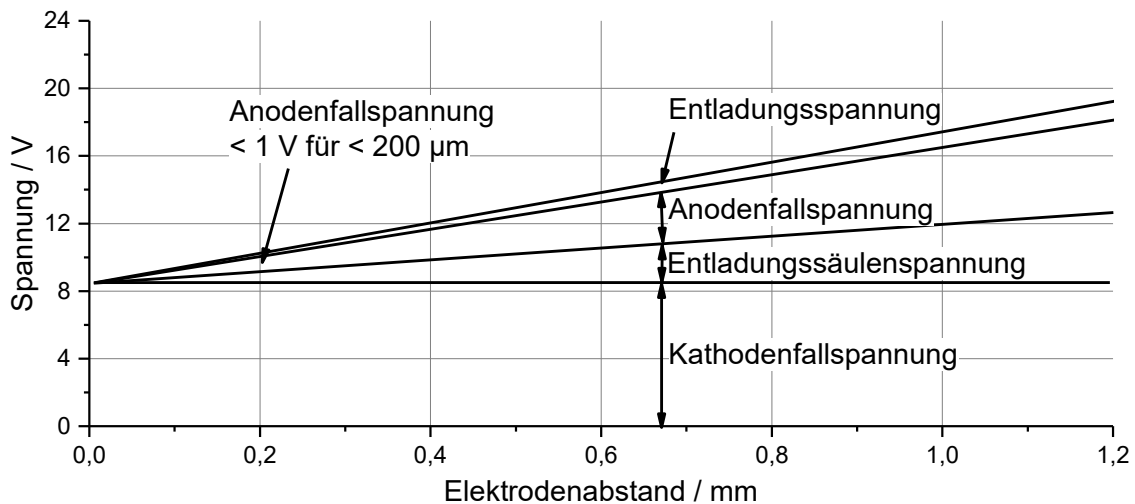


**Abbildung 3.7:** Gemessene Strom-Spannungs-Charakteristiken von Entladungen, Cadmium- und Wolfram-Elektroden in Methan-Luft-Gemisch von Faerstein, vgl. [FAE86]

Die Strom-Spannungs-Kennlinie für die Entladungen in Abbildung 3.7 zeigt die Abhängigkeit der Entladungsspannung vom Strom und dem Elektrodenabstand. Diese Kennlinien sind individuell für das jeweilige Elektrodenmaterial, die Elektrodenform, die Elektrodenbewegung, den Gastyp und den Stromkreis und durch eine Mindestspannung sowie einen Mindeststrom gekennzeichnet. Diese Mindestspannung ist nur abhängig vom Kathodenmaterial und unabhängig von der Stromstärke und dem Elektrodenabstand [RIE67]. In der Literatur werden für Cadmium verschiedene Mindestspannungen von 8,5 V von Widginton [WID66], 8,6 V von Babrauskas [BAR03], 9,8 V von Boxman [BSM95], 10 V von Reece [REE63] und 8,6 bis 11 V

von Grakov [GRA67] genannt. Anzumerken ist, dass die genannten Spannungswerte meist unter nicht bekannten Bedingungen ermittelt sind und aufgrund eines überlagerten oszillierenden Signals eine hohe Unsicherheit aufweisen. Als Mindestspannung wird in den Auswertungen dieser Arbeit der untere Spannungswert von 8,6 V von Grakov [GRA67] genutzt, da dieser die beste Übereinstimmung mit dem gemessenen Spannungssprung hat und die Bedingungen den Versuchsbedingungen in dieser Arbeit am nächsten kommen. Als Mindeststrom wird in der Literatur 30 mA angegeben [BAR03].

Die Kathodenfallspannung entspricht der o. g. Mindestspannung von 8,6 V [GRA67]. Die Anodenfallspannung wird bei Capps [CAP72] bei einem Elektrodenabstand von 1 mm mit 4 V angegeben. Bei den in dieser Arbeit auftretenden Entladungslängen kleiner als 200  $\mu\text{m}$  ergeben sich Spannungen kleiner als 1 V (vgl. Abbildung 3.8).



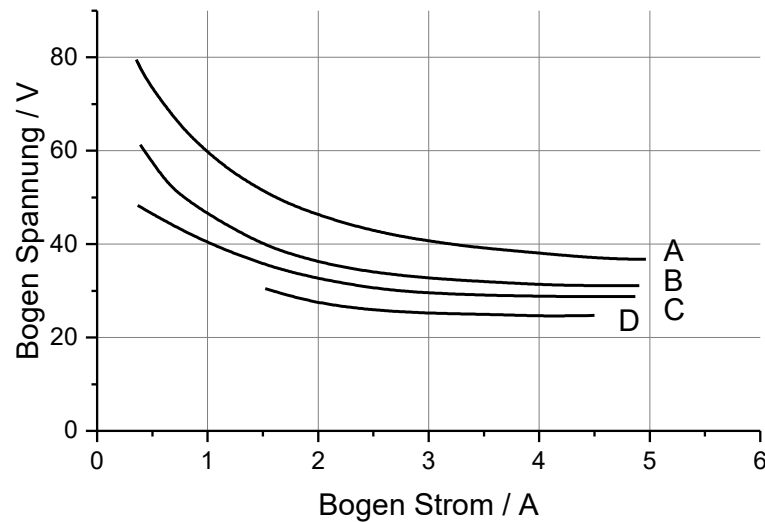
**Abbildung 3.8:** Spannungs-Elektrodenabstands-Gerade für plattenförmige Cadmium-Kathode und Wolfram-Anode mit Entladungen in Stickstoff, vgl. [CAP72]

Die Kennlinien in dieser Arbeit werden quasistatisch für die Worst-Case-Bedingungen der Entladung ermittelt und daher wird ein zeitabhängiges Verhalten wie beispielsweise nach Mayr [MAY43] oder nach Cassie [CAS39], nicht betrachtet. Die Mayr'sche Differentialgleichung (5) berücksichtigt das thermische Zeitverhalten des Bogens:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{U_E \cdot I_E}{P_{ab}} - 1 \right) \quad (5)$$

Dabei ist  $g$  der Leitwert der Entladung,  $U_E$  und  $I_E$  sind die Spannung und der Strom der Entladung,  $\tau$  ist eine Zeitkonstante, die aus der Wärmekapazität der Entladung resultiert und  $P_{ab}$  die von der Entladung abgegebene Leistung. In dieser Gleichung werden der Säulenquerschnitt und die Wärmeabfuhr als konstant angenommen und der Wärmehalt wird als Funktion der Temperatur berücksichtigt. Im Unterschied zu Mayr werden bei Cassie der spezifische Widerstand, der Energiegehalt je Volumeneinheit und der zeitliche Energieverlust je Volumeneinheit als konstant angenommen [ES74].

Bei geringeren Kontaktöffnungsgeschwindigkeiten werden von Widginton bzw. Babrauskas [BAR03] niedrigere Spannungs- und Stromwerte in der Lichtbogenkennlinie ermittelt (vgl. Abbildung 3.9).



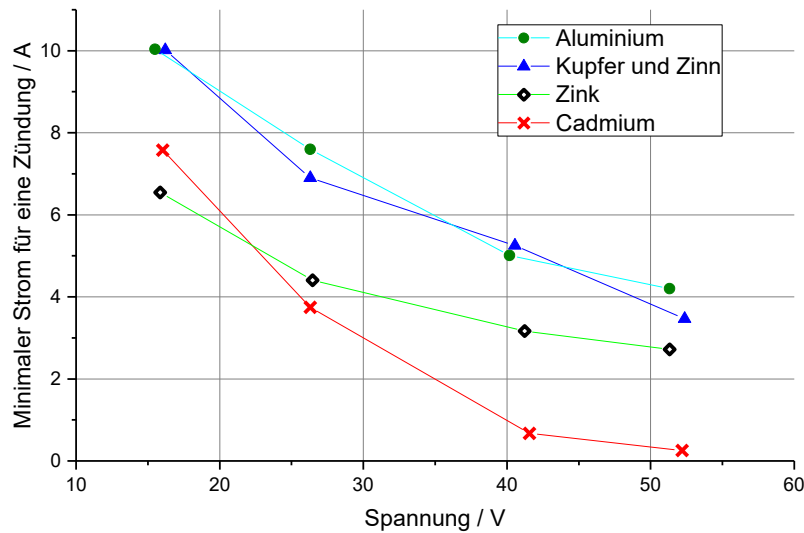
**Abbildung 3.9:** Kennlinien für Öffnungslichtbögen mit Kupfer-Elektroden; Elektrodenabstand  $A = 1 \text{ mm}$ ,  $B = 0,4 \text{ mm}$ ,  $C = 0,2 \text{ mm}$ ,  $D = 1 \text{ mm}$ ; Öffnungsgeschwindigkeit  $A = B = C = 20 \text{ m s}^{-1}$ ,  $D = 0,01 \text{ m s}^{-1}$ , vgl. [BAR03]

Wie in Abbildung 3.9 dargestellt, ergibt sich bei einer Kontaktöffnung im Elektrodenabstand von  $1 \text{ mm}$  bei einer viel geringeren Öffnungsgeschwindigkeit von  $0,01 \text{ m s}^{-1}$  eine Kennlinie (D) mit geringeren Spannungswerten als bei einer höheren Geschwindigkeit von  $20 \text{ m s}^{-1}$  (A, B, C). Im Vergleich zu den vorgenannten Kennlinien mit Cadmium und Wolfram sind mit dem Elektrodenmaterial Kupfer im vergleichbaren Spannungsbereich wesentlich größere Ströme bzw. bei vergleichbaren Stromwerten wesentlich höhere Spannungen für die Erzeugung von Entladungen erforderlich.

Mit den Strom-Spannungs-Kennlinien für die Entladungen steht ein kalkulierbarer Zusammenhang für die Beschreibung der Vorgänge im Zündprozess zur Verfügung.

### 3.4 Zündung von Gas-Luft-Gemischen

Das Zündverhalten von Stromkreisen im IEC-Funkenprüfgerät in Abhängigkeit der elektrischen Parameter ist in verschiedenen PTB-Berichten [SCH78], [Joh79] dokumentiert, die zum großen Teil in die relevanten Normen übernommen wurden (vgl. Kapitel 2). Grundlegendere Untersuchungen minimaler Ströme und Spannungen für eine Zündung bei verschiedenen Kathodenmaterialien im Funkenprüfgerät sind bei Widginton [WID66] zu finden (vgl. Abbildung 3.10).



**Abbildung 3.10:** Beispiele für Mindestzündströme und -spannungen für ausgewählte Kathodenmaterialien, in Methan, vgl. [WID66]

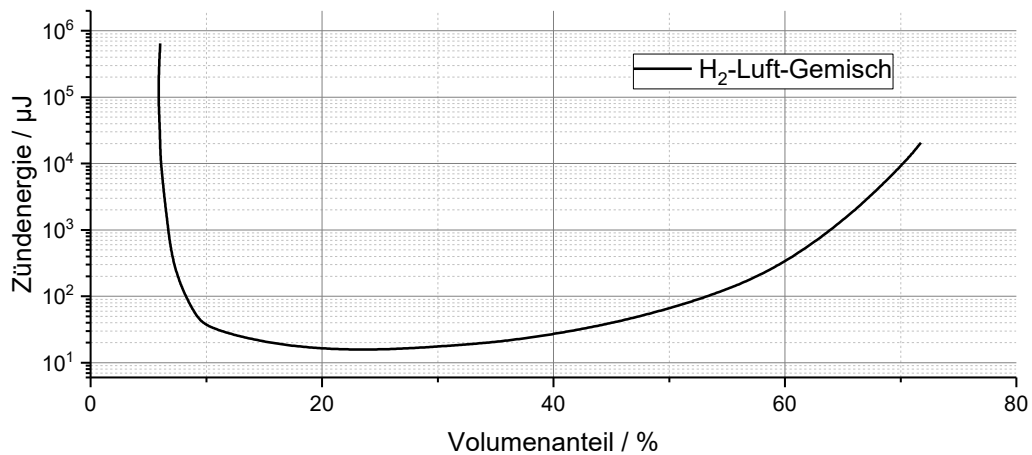
Die Abbildung 3.10 zeigt, dass bei Spannungen größer als ca. 24 V mit dem Elektrodenmaterial Cadmium Zündungen bei den geringsten Strömen und Spannungen möglich sind. Ergebnisse zu weiteren Elektrodenmaterialien und Oberflächenbeschaffenheiten sind bei Zalogin [ZAL05] zu finden.

In Johannsmeyer [Joh84] ist die rechnerische Methode zur Ermittlung der sogenannten „wirksamen Zündenergie“ einer Zündung durch kurzzeitige Entladungen bei Schließvorgängen für kapazitive Stromkreise beschrieben, die auch schon in Kapitel 2.3 erwähnt sind. Dabei wird von der in die Entladung eingebrachten elektrischen Energie  $W_{\text{brutto}}$  der Energieanteil  $W_{\text{netto}}$  ermittelt, der dem Gasgemisch zugeführt wird. Die Spannung der Entladung  $U_E$  wird um die empirisch ermittelte sogenannte Verlustspannung von  $U_V = 11 \text{ V}$  reduziert. Diese orientiert sich an der Anoden- ( $U_A = 4 \text{ V}$ ) und der Kathodenfallspannung ( $U_K = 8 \dots 8,5 \text{ V}$ ) (vgl. Gleichung (6)).

$$W_{\text{netto}} = \int_0^t (U_E(t) - U_V) \cdot I_E(t) dt \quad (6)$$

Auf die Nettoleistung  $P_{n,\text{max}}$  als zeitunabhängiger Anteil davon ist bereits in Kapitel 2.3 eingegangen worden.

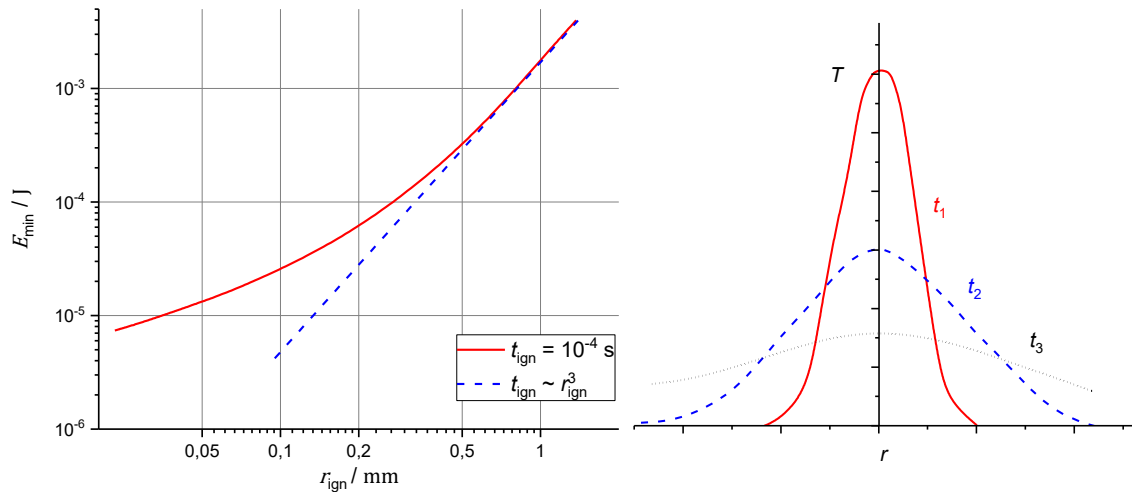
Im Explosionsschutz ist die erforderliche minimale Energie für eine Zündung einer bestimmten explosionsfähigen Atmosphäre als **Mindestzündenergie** (Minimum Ignition Energy, MIE) definiert und wird über eine standardisierte Messanordnung mittels Hochspannungsentladung ermittelt [WGL13]. Die Mindestzündenergie für Wasserstoff-Luft-Gemisch  $\varphi(\text{H}_2) = 22\%$  beträgt  $17\ \mu\text{J}$  [BM08]. Sie ist von der Konzentration abhängig (vgl. Abbildung 3.11).



**Abbildung 3.11:** Zündenergie in Abhängigkeit von der Wasserstoffkonzentration im Wasserstoff-Luft-Gemisch, vgl. [STE00]

Da die Norm IEC 60079-11 [INT11] ein Wasserstoff-Luft-Gemisch mit  $\varphi(\text{H}_2) = 21\%$  für die Prüfung fordert, das einen vergleichbaren Wert für die Mindestzündenergie hat (vgl. Abbildung 3.11), wird in den Untersuchungen dieser Arbeit ein Wasserstoff-Luft-Gemisch mit  $\varphi(\text{H}_2) = 21\%$  verwendet. Der Quenching-Abstand für Wasserstoff, d. h. der Spaltabstand, ab dem eine Zündung ausgelöscht wird, wird von Calcote et. al. [CGJ52] mit ca. 0,6 mm ermittelt. Die mit dem Quenching-Abstand korrespondierende flammendurchschlagsichere Spaltweite (engl. Maximum Experimental Safe Gap) wurde für Wasserstoff-Luft-Gemisch mit 0,29 mm bestimmt [BM08]. Das minimale initiale Volumen für eine Zündung beträgt nach Steen [STE00]  $0,1\ \text{mm}^3$  ( $\varnothing$  ca.  $288\ \mu\text{m}$  für ein Kugelvolumen).

Für die Einleitung einer Zündung muss die minimale Energiemenge  $E_{\min}$  einem entsprechenden Volumen in dem Gasgemisch zugeführt werden. Abbildung 3.12 links zeigt die bei größerem Volumen durch Wärmeleitungs- und Diffusionseffekte erforderliche höhere Energie, die zusätzlich vom Zeitraum des Energieeintrages abhängig ist.



**Abbildung 3.12:** Links: Zündenergie in Abhängigkeit vom Radius des Initialvolumens für eine Knallgas Mischung (Kugelgeometrie, Zünddauer 0,1 ms, 1 bar), vgl. [WM93]; rechts: Temperaturverteilung um eine Wärmequelle als Funktion des Radius, vgl. [FRE65]

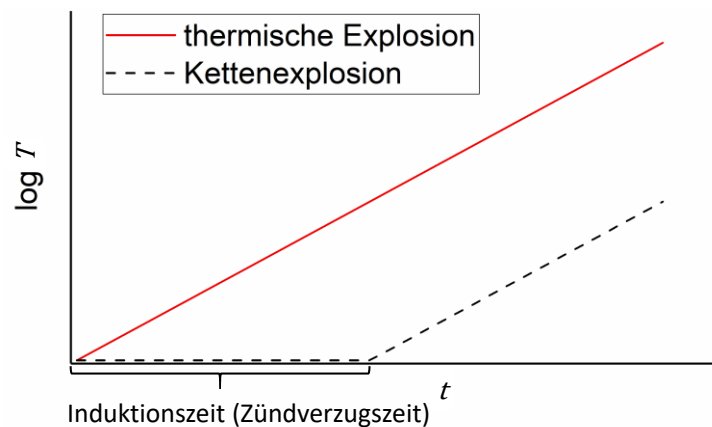
Bei einem Zündvorgang hat ein sehr kleines Volumen sehr kurzzeitig eine hohe Temperatur (Zeitpunkt  $t_1$ , rot). Wenn sich das kleine Volumen abkühlt und sich die Temperatur des umgebenden Gases erhöht (Zeitpunkte  $t_2$  und  $t_3$ , blau und schwarz) ergibt sich ein Temperaturfeld (vgl. Abbildung 3.12 rechts). Bei Entladungen in der Nähe der Zündgrenze vergrößert sich das Reaktionsgebiet auf eine Größe von ca. 200 bis 300  $\mu\text{m}$  im Durchmesser, bei der sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit signifikant verlangsamt. Danach entscheidet sich, ob die Zündung erlischt oder eine selbständig fortschreitende Zündung eintritt [SBU17]. Bei einer selbständig fortschreitenden Zündung breitet sich dann eine kugelhähnliche Verbrennungswelle aus [LE87], [GY08]. Bei einer Zündung im Zündgrenzbereich in der Nähe der Mindestzündenergie spielen die Startbedingungen zusammen mit den Verlustprozessen wie z. B. Wärmeübertragung zu den Elektroden oder Strahlungsverluste beim Zündprozess eine bedeutende Rolle. Der Zündprozess ist dann in der Praxis ein stochastischer Prozess, der einer Wahrscheinlichkeit unterliegt [EMM17], [WGL13].

Wenn die Zündung durch eine lokale Zündquelle, beispielsweise eine heiße kleine Fläche, Strahlung oder eine elektrische Entladung wie in dieser Arbeit erfolgt, wird von einer **Fremdzündung** gesprochen.

Im Unterschied zur Fremdzündung findet eine **Selbstzündung** statt, wenn sich ein Gasgemisch mit einer definierten Zusammensetzung bei einem bestimmten Druck und einer bestimmten Temperatur spontan entzündet. Für das zündwilligste Wasserstoff-Luft-Gemisch mit 22 % Volumenanteil bei Normaldruck ist die sogenannte Auto Ignition Temperature mit  $560^\circ\text{C}$  ermittelt [BM08]. Solche Zündungsprozesse werden durch die Theorien von Semenov und Frank-Kamenetskii beschrieben und ermöglichen die Bestimmung von Zündgrenzen in einem homogenen System bzw. bei idealem Wärmeaustausch [STE00] [WM93] [JOS39] [SN35] [FRA16].

Eine **thermische Zündung** (Wärmezündung) findet statt, wenn eine exotherme Reaktion des Gasgemisches erfolgt, bei der die Ausgangsstoffe eine höhere Enthalpie als das verbrannte Gas aufweisen. Bei der exothermen Reaktion erhitzt sich das Gas selbst und es bildet sich eine Flammfront mit steilem Gradienten der Verbrennungstemperatur zur Umgebungstemperatur. Bei einer Explosion steigt die Reaktionsrate exponentiell an [WM93].

Bei einer **nichtthermischen Zündung** (kalte Flamme) erfolgt eine Radikalkettenfortpflanzung ohne signifikante Temperaturerhöhung. Diese Reaktion kann sich ebenfalls sehr schnell ausbreiten und somit eine Explosion erfolgen. Beide Reaktionen können in einer Mischform als sogenannte Kettenexplosion auftreten, bei der erst während der sogenannten Induktionszeit Radikale gebildet werden und anschließend die Reaktion in eine exotherme Reaktion mit Flammfront übergeht (vgl. Abbildung 3.13) [WM93].

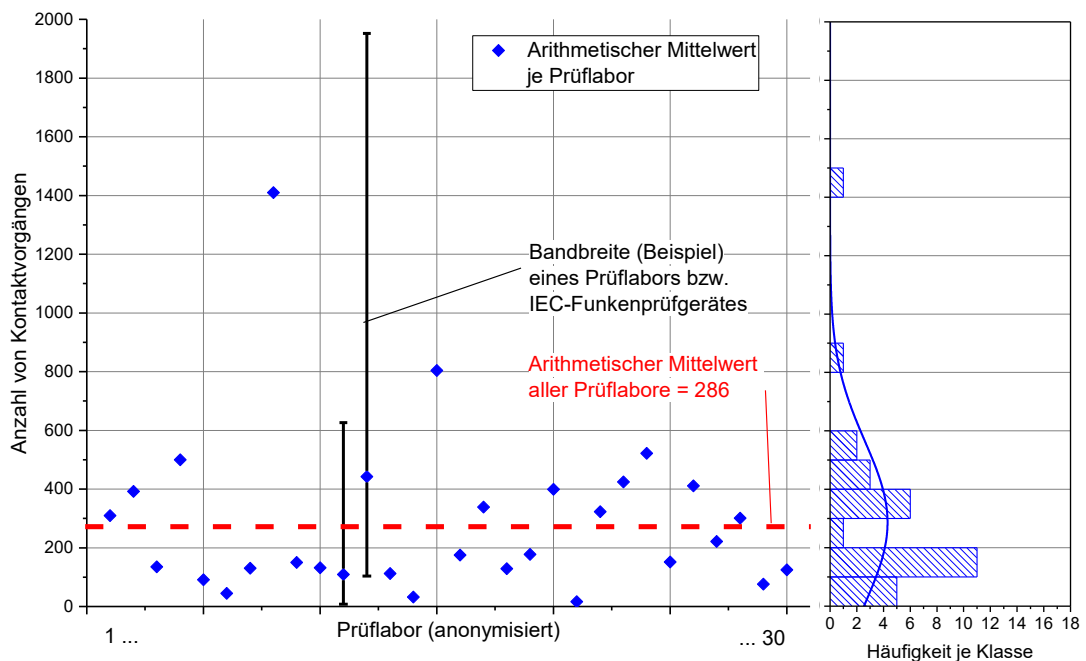


**Abbildung 3.13:** Schematischer Verlauf der Temperatur einer thermischen Explosion (rot) und Kettenexplosionen (schwarz gestrichelt) vgl. [WM93]

Die Abbildung 3.13 zeigt im Verlauf der Temperatur die zeitliche Verzögerung bei der Kettenexplosion im Vergleich zu einer Wärmezündung. Für die in dieser Arbeit behandelten Entladungen wird in einem anderen Zusammenhang beispielsweise eine Zündverzugszeit von  $25 \mu\text{s}$  ermittelt [GM97]. Kleine Mengen von Mikropartikeln haben ebenfalls einen Einfluss auf den Zündprozess. Jedoch hat Tolson [TOL72] mit Draht-Explosions-Versuchen ermittelt, dass besonders Metallpartikel mit geringem Schmelzpunkten wie Cadmium oder Zink keine direkte Zündung bewirken. Für die Zündung von Wasserstoff-Luft-Gemisch ( $\phi(\text{H}_2) = 21 \%$ ) durch kleine heiße Partikel mit einem Durchmesser ab  $500 \mu\text{m}$ , die durch Laserstrahlung erhitzt wurden, haben Beyer und Markus Zündtemperaturen im Bereich von  $1150 \text{ K}$  bis  $1350 \text{ K}$  ermittelt [BM12]. Plasmen im Nichtgleichgewicht beeinflussen die Radikalkettenreaktionen, fördern die Zündung von Brennstoff-Luft-Gemischen und beeinflussen damit die Induktionszeit. Dabei erzeugen die energiereichen Elektronen in verschiedenen Wechselwirkungen reaktive Radikale [STA06], [BCT10] [LAN13]. Die ausführlichen Elementarreaktionen der Zündung des Wasserstoff-Luft-Gemisches sind in der Literatur über Verbrennung bzw. Explosionen dargestellt [WM93], [GLA93], [JOS39], [FRE65], [LE87].

## 4 Problemstellung und Lösungsansatz

Die Hauptmotivation für die Durchführung dieser Arbeit ist, wie in Kapitel 1 dargestellt, die nicht ausreichende Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Prüfungen mit dem IEC-Funkenprüfgerät. In dem weltweiten Ringvergleichstest im Rahmen des Proficiency Testing Programs wurde bei gleichen Bedingungen und mit gleichen Prüfmustern eine große Streuung bei der Ermittlung der Anzahl der Kontaktvorgänge bis zur Zündung ermittelt [PHY12]. Im kompletten Ringvergleichstest wurden mithilfe von 12 verschiedenen Stromkreisen Ergebnisse verglichen (vgl. Beispiel in Abbildung 4.1). Die Prüflabore sind in der Darstellung anonymisiert.



**Abbildung 4.1:** Vergleich der Messergebnisse mit dem IEC-Funkenprüfgerät verschiedener Prüfstellen (links), zugehöriges Histogramm mit Gauß-Fit (rechts), vgl. [PHY12]

In Abbildung 4.1 sind links die Ergebnisse für einen im Ringvergleichstest vorgegebenen Stromkreis mit Strombegrenzung dargestellt. Dieser ist vergleichbar mit dem Stromkreis in der vorliegenden Arbeit, liefert jedoch einen höheren Stromwert. Bei einer Messung wird die Anzahl der Kontaktvorgänge bis zu einer Zündung ermittelt. Bei wenigen Kontaktvorgängen bis zur Zündung ist der Stromkreis unsicherer als bei vielen Kontaktvorgängen. Bei diesem Stromkreis des Ringvergleichstests sollte eine Zündung im IEC-Funkenprüfgerät mit wesentlich weniger Kontaktvorgängen als 1000 erfolgen. Beispiele für die Streuung eines einzelnen IEC-Funkenprüfgerätes mit typischen minimalen und maximalen Anzahlen der Kontaktvorgänge  $KV$  bis zu einer Zündung zeigen die zwei Balken mit der Bandbreite in Abbildung 4.1. Aus den Ergebnissen von 20 Messungen ergibt sich über Gleichung 7 der arithmetische Mittelwert je IEC-Funkenprüfgerät bzw. Prüflabor (blaue Raute).



$$\overline{KV} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} KV_i \quad (7)$$

Die einzelnen arithmetischen Mittelwerte zeigen die Streuung der Ergebnisse der Prüfstellen bzw. der IEC-Funkenprüfgeräte untereinander. Der arithmetische Mittelwert aller Prüfstellen ergibt einen Wert von 286 (rote Strichlinie). Für die einzelnen Prüfstellen ergeben sich arithmetische Mittelwerte der Kontaktvorgänge bis zur Zündung von 17 bis 1410. Aus dem Kehrwert lassen sich Zündwahrscheinlichkeiten von  $0,7 \cdot 10^{-3} < Z < 60 \cdot 10^{-3}$  berechnen. Eine Abschätzung der Signifikanz  $c$  des maximalen Wertes von 1410 Kontaktvorgängen kann mit der Normalverteilung, dem arithmetischen Mittelwert bzw. Schätzwert  $\mu = 286$  und der Standardabweichung  $\sigma = 278$  über die nachfolgende Gleichung stattfinden.

$$c = \frac{|\overline{KV} - \mu|}{\sigma} = \frac{|1410 - 286|}{278} = 4 \quad (8)$$

Der maximale Wert mit einer Signifikanz  $c = 4$  wird daher statistisch als nicht repräsentativ nach Bechtloff [BEC11] bzw. mit dem Ausreissertest nach Pesch [PES09] als hochsignifikanter Ausreißer bewertet. Eine hohe Signifikanz bedeutet einen relativ großen Abstand des Ausreißers zum Mittelwert im Verhältnis zur Standardabweichung. Aus der sicherheitsorientierten Perspektive des Explosionsschutzes ist es jedoch zwingend notwendig, dass der Ausreißer analysiert und ein evtl. bestehender Handlungsbedarf ermittelt wird.

Abbildung 4.1 rechts zeigt das Histogramm der arithmetischen Mittelwerte mit einer Anpassung der Normalverteilung. Die Normalverteilung scheint nach dem optischen Eindruck nicht ideal zu den Werten des Histogramms passen. Weitere Analysen hierzu können Themen in zukünftigen Forschungsaufgaben sein. Eine teilnehmerspezifische Korrelation konnte im Proficiency Testing Program nicht identifiziert werden [KWK13]. Die Zündwahrscheinlichkeiten können sich auch während eines Versuches verändern [PHY12]. Die genannten Schwankungen sind ebenfalls aus dem Prüfalltag bekannt und hinsichtlich von Prüfungen an der Zündgrenze eine Herausforderung.

Beim wissenschaftlichen Arbeiten wird Messen mit höchster Genauigkeit und Zuverlässigkeit angestrebt. Dazu gehört auch eine Betrachtung der Unsicherheiten. Dieser Philosophie folgt der nachfolgende Ansatz für die alternative Prüfmethode.

Beim internationalen Vergleichstest des Proficiency Testing Program sind als wesentliche Ursachen für die Schwankungen folgende Punkte ermittelt worden:

- die Beschaffenheit und der Zustand der Elektroden (Rauheit, Fremdschichten, Einspannwinkel, Biegeverhalten und Länge der Wolframdrähte etc.),
- die Gaszusammensetzung und Feuchte sowie
- elektrische parasitäre Effekte.

Konstruktionsbedingt wird eine Detailverbesserung des IEC-Funkenprüfgerätes als nicht zielführend angesehen. Vielmehr ist es internationaler Konsens, das grundlegende Funktionsprinzip des Funkenprüfgerätes beizubehalten, aber die bislang vorhandenen Nachteile innerhalb eines neuen Rahmens zu beseitigen. Im Ergebnis soll die Prüfung der Kontaktentladung präziser und besser reproduzierbar durchgeführt werden können.

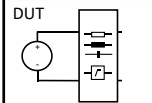
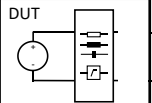
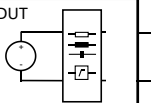
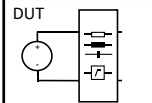
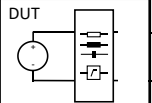
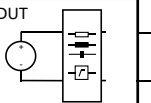
Die Herausforderung dabei besteht darin, am Grundprinzip der Funkenprüfung nach IEC 60079-11 [INT11] mit der Nutzung der Zündgrenze von elektrischen Entladungen bei Kontaktvorgängen festzuhalten. Das bedeutet eine Beibehaltung von:

- der Erzeugung von Öffnungs- und Schließvorgänge unter Worst-Case-Bedingungen,
- der Realisierung verschiedener Elektrodenbewegungen,
- der Verwendung einer Wolfram-Anode mit 200 µm Durchmesser und
- der Nutzung einer Cadmium-Kathode mit einer aktivierten Oberfläche sowie
- der Nutzung eines definierten Gasgemisches.

Die auf diesen Grundprinzipien basierende Nachbildung der Worst-Case-Entladung wird in Tabelle 2 der Prüfung mit dem IEC-Funkenprüfgerät sowie der erforderlichen Analyse der Worst-Case-Entladung gegenübergestellt.

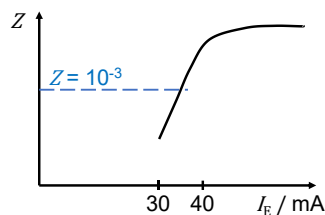
In der Tabelle 2 sind in der linken Spalte die genannten Ergebnisse und Eigenschaften, bei der Prüfung mit dem IEC-Funkenprüfgerät aufgeführt. Bei der Ermittlung der stromkreisabhängigen Zündgrenze werden die jeweiligen minimalen Strom- und Spannungswerte bestimmt, bei denen eine Entladung gerade noch eine Zündung bewirkt. Diese Entladungen treten während vieler verschiedener Kontaktvorgänge im IEC-Funkenprüfgerät äußerst selten auf und repräsentieren somit Entladungen an der Zündgrenze. Die Zündgrenzen nach den Normen IEC 60079-11 [INT11] und IEC 60079-25 [INT10] basieren auf einer Zündwahrscheinlichkeit der Entladungen von  $Z = 1 \cdot 10^{-3}$ , d. h., dass im Mittel jeder tausendste Kontaktvorgang zündet (vgl. Kapitel 2.2). Die Bedingungen für solche und seltener auftretende Entladungen mit einer Zündwahrscheinlichkeit von  $Z \leq 1 \cdot 10^{-3}$  werden nachfolgend als **Worst-Case-Bedingungen** bezeichnet.

**Tabelle 2:** Gegenüberstellung der Prüfmethode mit dem IEC-Funkenprüfgerät, des Lösungsansatzes mit der Analyse sowie der Nachbildung der Worst-Case-Entladung

Stand der Normung: Prüfung mit dem IEC-Funkenprüfgerät	Kurzfristiges Ziel Ansatz: Analyse der Worst-Case-Entladung	Langfristiges Ziel: Nachbildung der Worst-Case-Entladung z. B.: Elektronik, Software
 <p>hier: - 30 mA, 40 mA, 60 mA, 100 mA (const.) - max. 30 V</p>	 <p>hier: - H<sub>2</sub>-Luft-Gemisch</p>	 <p>hier: - Worst-Case- Kontaktöffnung - H<sub>2</sub>-Luft-Gemisch</p>
 <p>hier: - 30 mA, 40 mA, 60 mA, 100 mA (const.) - max. 30 V</p>	 <p>hier: - 30 mA, 40 mA, 60 mA, 100 mA (const.) - max. 30 V</p>	 <p>hier: - Worst-Case- Entladung über Kennlinien</p>

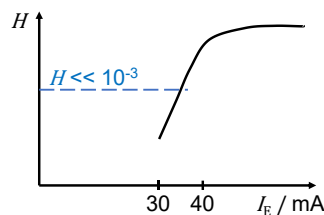
### Ergebnisse:

**Zündgrenze ca. 35 mA**  
entspricht der  
Zündwahrscheinlichkeit  
 $Z = 10^{-3}$



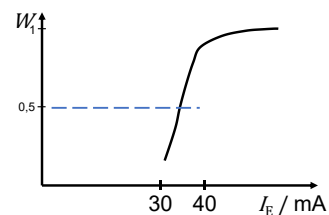
Jedoch **große Streuung und ungenügende Reproduzierbarkeit**, an der Zündgrenze ( $Z = 10^{-3}$ ) sind Worst-Case-Entladungen relevant.

**Zündgrenze bei gleichem Stromwert**, die Häufigkeit bezieht sich auf eine Kontaktöffnung



Reproduzierbare Worst-Case-Entladungen, zur Ermittlung der stromkreisspezifischen UI-Kennlinie, Zündkriterien und Messunsicherheit

**Zündgrenze bei gleichem Stromwert**, Wahrscheinlichkeit der Zündung über Kennlinie mit Zündkriterium



**Reproduzierbare Nachbildung der Worst-Case-Entladung** orientiert an der Physik der Entladung.

### Eigenschaften:

Verschiedene zufällige

- Kontaktöffnungs-geschwindigkeiten
- Durchschlag-spannungen
- Entladungsdauern

Nichtlineare Zusammenhänge  
Heteroskedastizität

Worst-Case-Bedingungen mit definierter

- Öffnungsbewegung (Geschwindigkeiten, Vorprozesse)
- Oberflächenrauheit
- Randbedingungen

Angaben über Strom- bzw. Leistungsreserve möglich  
Hier: quasistatisch, dynamische Situationen (vgl. Ausblick).  
Umfassende Situationen über eine Simulation (vgl. Ausblick)

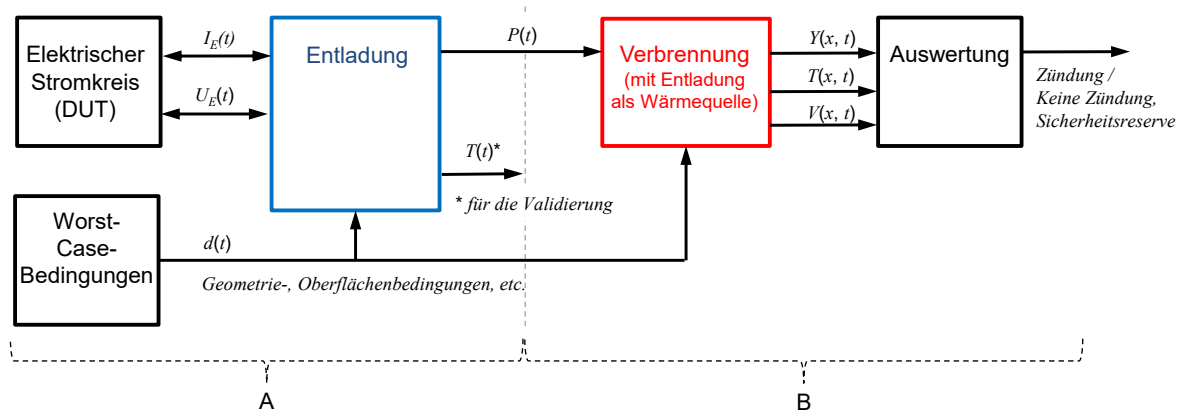
Der Lösungsansatz für die alternative Prüfmethode verwendet diese definierten Worst-Case-Bedingungen (vgl. Tabelle 2, mittlere Spalte), um mit ihnen reproduzierbare Entladungen an der Zündgrenze zu erzeugen und durch Parameteranalyse zu charakterisieren. Dies ermöglicht die Nachbildung über die Berechnung der Zündwahrscheinlichkeit der Entladung mithilfe der ermittelten Parameter (vgl. Tabelle 2, rechte Spalte). Im Unterschied zum IEC-Funkenprüfgerät ist unter diesen Bedingungen eine Charakterisierung und Nachbildung der Entladung möglich, die sich an der Physik der einzelnen Worst-Case-Entladungen orientiert. Diese ermöglicht eine präzisere messtechnische Ermittlung und Beschreibung der Entladung. Ebenfalls ist eine Bestimmung der Messunsicherheit möglich. Damit werden die relevanten Einflüsse für die Worst-Case-Bedingungen berücksichtigt. Neben der Beschreibung der Entladung in den Charakteristiken werden auch Untersuchungen von Zündkriterien zur vereinfachten Ermittlung der Zündfähigkeit dargestellt, um für die industrielle Zulassungspraxis möglichst einfach handhabbare Kriterien ableiten zu können. Die Zündkriterien beruhen auf der Analyse der elektrischen Leistung und von stromkreisspezifischen Grenzwerten. Langfristig ist hier die Anwendung einer Simulation vorgesehen, um auch die bei dynamischen Vorgängen umfassenderen Bedingungen und Zündkriterien zu berücksichtigen.

Für die Ermittlung der Worst-Case-Bedingungen wurden spezielle experimentelle Kontaktvorrichtungen geschaffen, die auf den zuvor genannten Grundprinzipien basieren. Diese bilden einen öffnenden und schließenden elektrischen Kontaktvorgang in explosionsfähiger Atmosphäre nach (vgl. Kapitel 5.2). Die Kathode besteht aus einem Cadmium-Block. Ihre Oberfläche wird mit definierter Geschwindigkeit an einem Wolfram-Draht vorbei bewegt. Der Wolfram-Draht kann dabei gezielt von der Oberfläche weg bzw. hin bewegt werden, um den Kontakt mit einer definierten Bewegung zu öffnen oder zu schließen. Ziel dieser Experimente ist, die typischen Kontaktbewegungen im Funkenprüfgerät präziser zu verstehen und nachfolgend besser reproduzierbare Entladungen erzeugen zu können. Mit diesen Kontaktvorrichtungen sind die Analyse des Kontaktvorganges über die Separation von Vorgängen und Effekten sowie die Ermittlung der relevanten Einflussfaktoren über die Variation von Parametern möglich [SCH88].

Aufgrund der Komplexität der Vorgänge fokussiert sich diese Arbeit ausschließlich auf Kontaktöffnungsvorgänge in Verbindung mit einer Konstantstromregelung mit Maximalspannungsbegrenzung (rechteckförmige Kennlinie), da diese in der Praxis häufig eingesetzt werden und eine normenkonforme Prüfung der Eigensicherheit nur aufwendig zu realisieren ist. Die in den Untersuchungen erzeugten Entladungen werden auf der Basis der Stromwerte mit den Entladungen des IEC-Funkenprüfgerätes verglichen (vgl. Kapitel 7.5). Die Worst-Case-Bedingungen werden über die Zündgrenzwerte bei unterschiedlichen Stromwerten validiert.

Zur Lösung der Problemstellung wurden sowohl experimentelle Untersuchungen als auch Simulationsrechnungen durchgeführt. Die Simulationsrechnungen waren die Aufgabe von Rajiv Shekhar in Zusammenarbeit mit der PTB [SHE18], während die experimentellen Untersuchungen Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind (zur Abgrenzung beider Arbeiten vgl. auch Abbildung 4.2 und in [USG16]). So können die Ergebnisse dieser Arbeit als Basisdaten für weiterführende Simulationen dienen.

Die Zusammenhänge zwischen einer zündfähigen Entladung und den relevanten Parametern als Grundlage für die Simulation sind in der folgenden Abbildung dargestellt (Abbildung 4.2).



**Abbildung 4.2:** Schematische Übersicht für die wesentlichen Vorgänge, relevanten Einflüsse und Zusammenhänge bei einer Zündung durch eine Entladung, vgl. [USG16].

In Abbildung 4.2 stellt der zu prüfende elektrische Stromkreis (DUT) die Energie über die angelegte Spannung  $U_E(t)$  und den Strom  $I_E(t)$  für die Entladung zur Verfügung. Diese wird durch die Elektrodenbewegung bzw. den Abstand der Kontaktöffnung  $d(t)$  und die Worst-Case-Bedingungen, wie beispielsweise die Oberflächenbeschaffenheit, beeinflusst. In der elektrischen Entladung stellt sich ein elektrischer Leitwert ein, der auf den elektrischen Stromkreis zurückwirkt. Die elektrische Leistung  $P(t)$  der Entladung wird in dieser Übersicht der Verbrennung als Wärmestrom zur Verfügung gestellt und es ergeben sich eine zeitabhängige räumliche Verteilung der Spezies  $Y(x, t)$ , sowie ein Temperatur-  $T(x, t)$  und Strömungsfeld  $V(x, t)$ . Erst dann, wenn durch den Wärmestrom der Entladung bei der Verbrennung die exotherme Reaktion selbständig fortschreitet, erfolgt die Zündung. Die Temperatur der Entladung  $T(t)^*$  dient der Validierung der Simulation bzw. für ein tieferes Verständnis. Die ermittelten Charakteristiken der elektrischen Entladung (vgl. Abbildung 4.2, Klammer A) stehen dann für die Nutzung in einer Simulation (vgl. Abbildung 4.2, Klammer B) zur Verfügung.

Eine Beurteilung der Zündfähigkeit mit der in dieser Arbeit beschriebenen Methode muss anders als mit dem IEC-Funkenprüfgerät durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen mit der neuen Methode basieren auf der Zündgrenze von Worst-Case-Entladungen und stimmen nicht exakt mit der Häufigkeit einer Zündung des

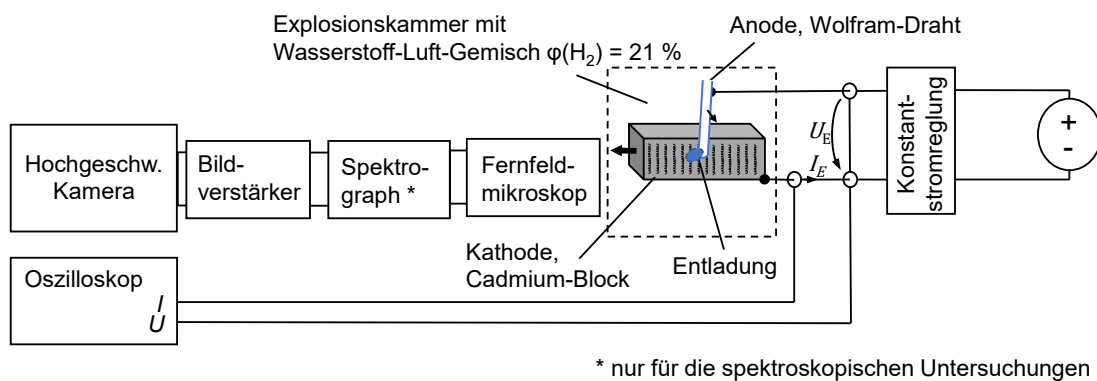
IEC-Funkenprüfgerätes überein. Das ist konstruktionsbedingt nicht möglich, da die Ergebnisse der Prüfungen mit dem IEC-Funkenprüfgerät stark streuen und auch die zahlreichen international genutzten IEC-Funkenprüfgeräte starke Unterschiede aufweisen. Eine Prüfung mit der neuen Methode ist einfacher, schneller und erfordert kein Cadmium und keine Gasgemischanlage. Der Ansatz für die neue Prüfmethode erlaubt besser reproduzierbare Ergebnisse, die nicht mehr von dem einzelnen Prüfgerät abhängen. Sie orientieren sich vielmehr an der Physik der Entladungen. Damit können erstmalig Unsicherheiten abgeschätzt werden.

## 5 Experimenteller Aufbau und Messtechnik

In diesem Kapitel wird der Versuchsaufbau für die Ermittlung der Worst-Case-Bedingungen, der Strom-Spannungs-Kennlinie sowie der spektroskopischen Untersuchungen erläutert. Dabei wird für eine Übersicht erst auf den umfassenden Versuchsaufbau und anschließend auf die verschiedenen Kontaktvorrichtungen, auf die Gasgemischanlage sowie auf die Messunsicherheitsbetrachtung eingegangen.

### 5.1 Versuchsaufbau

Abbildung 5.1 zeigt in der schematischen Darstellung eine Übersicht des Versuchsaufbaus mit der Messtechnik, der Kontaktvorrichtung in der Explosionskammer und der Spannungsquelle.



**Abbildung 5.1:** Versuchsaufbau für optische und spektroskopische Untersuchungen von Entladungen in Wasserstoff-Luft-Gemisch, vgl. [UHF18], [URB18]

Die Elektroden der Kontaktvorrichtung werden über eine Konstantstromregelung mit Maximalspannungsbegrenzung mit elektrischer Energie versorgt. Der vorgebbare konstante Stromwert ermöglicht durch die Fixierung eines Parameters eine gezielte und systematische Durchführung der Versuche und eine gegenüber beispielsweise resistiven Stromkreisen einfachere Auswertung. Unbedingte Voraussetzung für die Erzeugung von zündfähigen Entladungen ist, dass die Konstantstromregelung auf die sehr kurzen Strompeaks der Entladung schnell reagieren kann bzw. schnell nachregelt (vgl. Abschnitt 6.3 Spannungsquelle mit Konstantstrom). Die Parameter des Stromkreises im Versuchsaufbau sind  $L < 10\ \mu\text{H}$  und  $C < 10\ \text{pF}$  und werden mit einem LCR-Meter<sup>3</sup> ermittelt. Die elektrischen Parameter werden mit einem Oszilloskop<sup>4</sup>, einem Differenzastkopf<sup>5</sup> und einer Stromzange<sup>6</sup> mit einer Abtastrate von mindestens 625 kS/s, d. h. mit  $1,6\ \mu\text{s}$  zwischen zwei Werten aufgenommen.

<sup>3</sup> LCR-Meter, GenRad 1689 Precision RLC Digibridge [IET06]

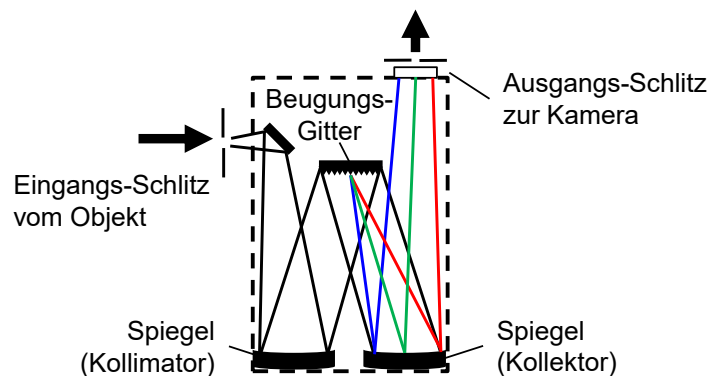
<sup>4</sup> Oszilloskop Yokogawa DL9040L [YOK09]

<sup>5</sup> Tastkopf Yokogawa 7019-43 1:100

<sup>6</sup> Stromzange Tektronix T CPA300 [TEK03]

Die Aufnahmen für die Ermittlung der Länge bzw. Geometrie der Entladungen erfolgen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera<sup>7</sup>, einem Bildverstärker<sup>8</sup> und einem Fernfeldmikroskop<sup>9</sup>. Der Bildverstärker ist aufgrund der geringen Strahlungsintensität der Entladungen und das Fernfeldmikroskop wegen der kleinen Dimensionen erforderlich. Die optisch ermittelten Längen der Strom-Spannungs-Charakteristiken werden mit einer Bildrate von 30 000 fps, d. h.  $33 \mu\text{s}$  je Bild, aufgenommen. Für eine Korrelation der elektrischen und der optischen Messungen ist der Mittelwert der zugehörigen Spannungswerte für einen Belichtungszeitraum berechnet. Zur Kalibrierung der Längenmessung der Entladung mit diesem optischen System ist ein lateraler Kalibriermaßstab mittels Lasergravur (Pitch  $396 \mu\text{m}$ ) erstellt worden. Die Auswertesoftware wird ebenfalls mit diesem Maßstab kalibriert. Die maximal mögliche Auflösung des optischen Systems, d. h. das visuelle Unterscheiden der Linien auf einem Auflösungsnormal, beträgt ohne Bildverstärker  $\pm 6,25 \mu\text{m}$  ( $12,5 \mu\text{m}$  Strichabstand) und mit Bildverstärker  $\pm 12,5 \mu\text{m}$  ( $25 \mu\text{m}$  Strichabstand), vgl. [UHF18], [URB18].

Die optische Emissionsspektroskopie (OES) erfolgt mit einem Gitterspektrometer<sup>10</sup>, das aus einem Eingangsspalt, einem Kollimatorspiegel zur Parallelisierung des Lichtstrahles, einem Beugungsgitter zur spektralen Aufspaltung des Lichtstrahles und einem Konkavspiegel zur Fokussierung auf den Ausgangsspalt besteht (vgl. Abbildung 5.2). Das Spektrometer verfügt über drei verschiedene Gitter mit  $150 \text{ Linien mm}^{-1}$ ,  $1200 \text{ Linien mm}^{-1}$  und  $2400 \text{ Linien mm}^{-1}$ . Mit höherer Linienzahl des Gitters steigt die spektrale Auflösung und der gleichzeitig erfasste Spektralbereich nimmt ab.



**Abbildung 5.2:** Schematischer Aufbau des Gitterspektrometers (Acton Research Cooperation Typ 300i), vgl. [ACT96]

Für den beschriebenen Versuchsaufbau ist mit einer Kalibrierleuchte, ideal eingestellten Schlitzblenden und dem Gitter mit  $150 \text{ Linien mm}^{-1}$  für eine Wellenlänge von  $550 \text{ nm}$  eine Halbwertsbreite von  $\approx 0,52 \text{ nm}$  ermittelt worden. Da sich jedoch in den Versuchen die Position der Entladungen hinter dem Schlitz der Schlitzblende verändert und die Intensität der

<sup>7</sup> Hochgeschwindigkeitskamera Photron Fastcam SA5 [PHO14].

<sup>8</sup> Bildverstärker Hamamatsu C10880 [HAM16].

<sup>9</sup> Fernfeldmikroskop Questar QM1 [QUE18].

<sup>10</sup> Gitterspektrometer Acton Research Cooperation Typ 300i [ACT96].



Entladungen sehr gering ist, wird nur mit weit geöffneten Schlitzblenden gemessen und somit lediglich die natürliche Breite der Entladungen genutzt.

Die Wellenlängenkalibrierung wird mit einer Cadmium-Leuchte<sup>11</sup> durchgeführt. Der dabei ermittelte mathematische Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und der vertikalen Position im Kamerabild ermöglicht die Zuordnung der Messwerte zu den Wellenlängen. Über die relative Intensitätskalibrierung des Systems mit einer Halogenleuchte<sup>12</sup> kann der Intensitätswert aus der Bildinformation der Kameraaufnahmen berechnet werden. Beide Leuchten sind von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt AG 4.11 (Spektroradiometrie) kalibriert worden. Bedingt durch die Strahlungsintensität erfolgten die spektroskopischen Aufnahmen mit einer Bildrate von 10 000 fps und einer Belichtungszeit von 100  $\mu$ s.

Vor den Versuchen und Einleiten des Gasgemisches wird die Kammer für 5 Minuten mit Luft gespült, um Einflüsse von vorhergehenden Explosionen wie Feuchtigkeit oder Temperaturerhöhungen zu beseitigen.

Die Explosionskammer (Volumen 12 Liter) wird über eine Gasgemischanlage mit dem Wasserstoff-Luft-Gemisch entsprechend IEC 60079-11 [INT11] gefüllt. Dabei wird das Gasgemisch über Massenstromregler<sup>13</sup> aus einem Druckluftstrom sowie aus Wasserstoff<sup>14</sup> in der Explosionskammer gebildet. Um eine möglichst homogene und vollständige Befüllung zu gewährleisten, wird in die Kammer bei geöffnetem Ausgangsventil das dreifache Volumen des Gemisches durch- bzw. eingeleitet. Die Zusammensetzung des Gemisches wurde am Ausgang der Explosionskammer mit einem Sauerstoffanalysator<sup>15</sup> zyklisch überprüft.

## 5.2 Kontaktvorrichtungen

Eine optische Untersuchung der Entladungen im IEC-Funkenprüfgerät ist aufgrund des nicht vorhersagbaren Ortes, an dem die Entladung auftritt, nicht möglich. Deshalb werden eigens für diese Versuche gefertigte experimentelle Kontaktvorrichtungen eingesetzt, die definierte Bewegungsabläufe des IEC-Funkenprüfgerätes zur Erzeugung von Entladungen an einem annähernd gleichen Ort nachbilden.

Dafür wurde eine erste Kontaktvorrichtung 1 geschaffen, die elektrische Entladungen bei schnelleren Kontaktöffnungen am gleichen Ort erzeugt. Im Rahmen der Untersuchungen entstand eine weitere Kontaktvorrichtung 2, die eine langsamere Kontaktöffnungsbewegung als Kontaktvorrichtung 1 durchführt. Dies war erforderlich, da nur mit der Kontaktvorrichtung 2 die Entladungen an der Zündgrenze mit den Worst-Case-Bedingungen erzeugt werden

---

<sup>11</sup> Cadmium-Leuchte Pen-Ray, LFT Laboratory GmbH [LTF18].

<sup>12</sup> Halogen-Leuchte OSRAM HLX 64361 150 W 6,6 A [OSR18].

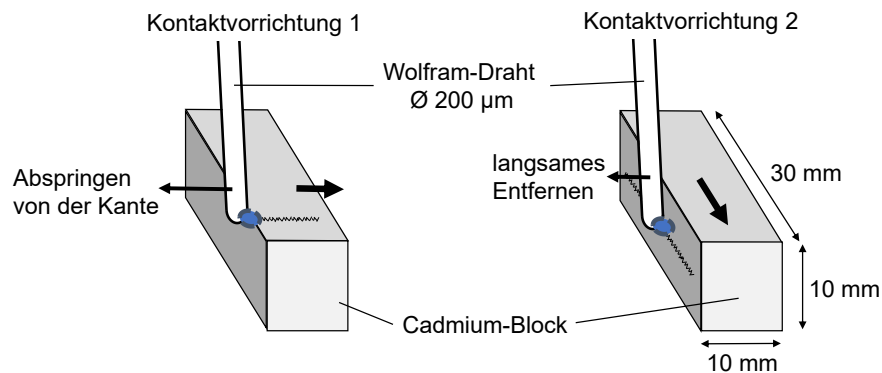
<sup>13</sup> Massenstromregler Fa. Bronkhorst High-Tech.

<sup>14</sup> Wasserstoff 5.0, Reinheit  $\phi \geq 99,999$  % Wasserstoff.

<sup>15</sup> Sauerstoffanalysator Servoflex MiniHD (5200), Servomex.

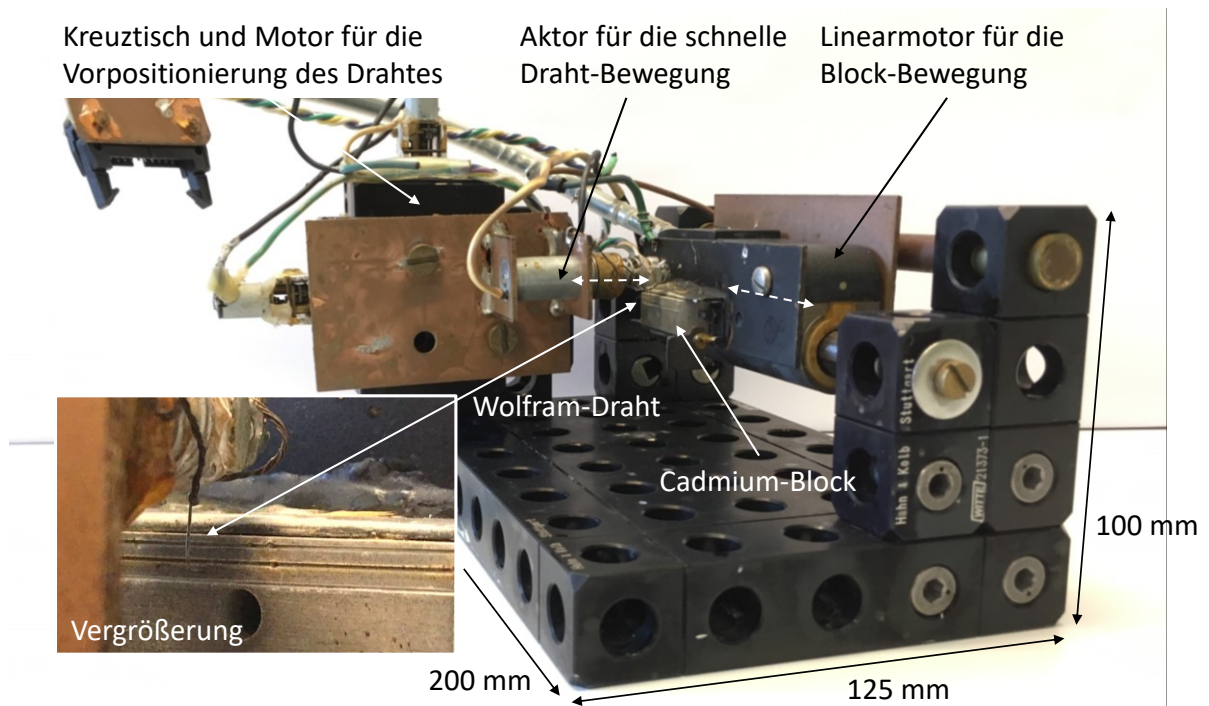
können. Es wird angenommen, dass bei einer schnelleren Kontaktöffnung der Kontaktvorrichtung 1 höhere Verluste kompensiert werden müssen und somit weniger Energie für die Aufrechterhaltung der Entladung und für den Transfer in das Gas zur Verfügung steht. Wie auch schon in Kapitel 3.4 dargestellt, sind für schnellere Kontaktöffnungen höhere Spannungen und Ströme erforderlich [WID66]. Alle Untersuchungen zu den Charakteristiken der Entladungen in dieser Arbeit basieren auf der Kontaktvorrichtung 2 mit den Worst-Case-Bedingungen.

Bei der Kontaktvorrichtung 1 wird die Drahtspitze über die Oberfläche geführt und der Cadmium-Block vom Draht wegbewegt. Wenn die Spitze des gespannten Drahtes die Kante verlässt, erreicht die Drahtspitze höhere Geschwindigkeiten als die Geschwindigkeit des Drahthalters. Bei der Kontaktvorrichtung 2 bewegt sich der Draht entlang der Kante und entfernt sich mit geringerer Beschleunigung und Geschwindigkeit (vgl. Abbildung 5.3).



**Abbildung 5.3:** Schematische Anordnung der Elektroden sowie die Bewegungen in den Kontaktvorrichtungen 1 und 2

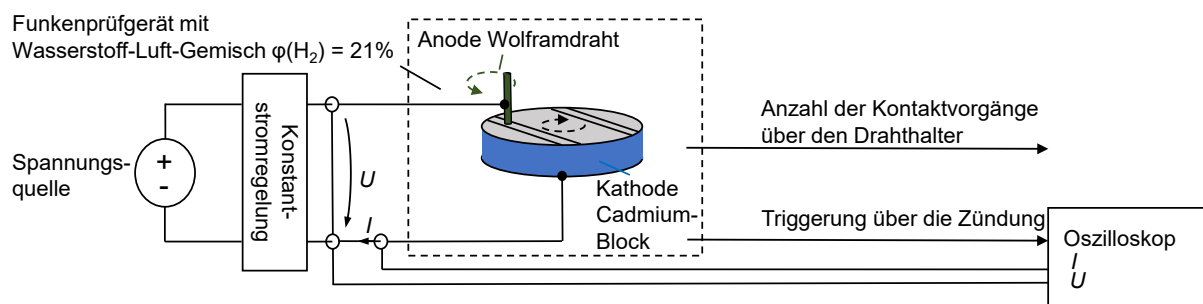
Für die Nachbildung der Bewegungen mit der Kontaktvorrichtung 2 wird der Cadmium-Block mit einem Linearmotor bewegt. Der Wolfram-Draht wird einerseits mit einem Kreutztisch und einem Motor positioniert und die maßgebliche Kontaktöffnungs-Bewegung erfolgt andererseits über einen Aktor. Für die Versuche ist die komplette Kontaktvorrichtung in der Explosionskammer installiert.



**Abbildung 5.4:** Foto der Kontaktvorrichtung 2 mit Angabe der Bewegungsrichtung (gestrichelte Linie)

Auf die detaillierte Bewegung wird in Kapitel 6.1 eingegangen. Diese Kontaktvorrichtung erzeugt die Entladungen zwischen dem Draht und dem Cadmium-Block an einer annähernd festen Position in der Fokusebene der Kamera. Das ermöglicht die Untersuchung mit optischen Komponenten.

Ergänzend zu den vorgenannten experimentellen Kontaktvorrichtungen wird für die Validierung der Stromwerte an der Zündgrenze das IEC-Funkenprüfgerät genutzt. (vgl. Abbildung 5.5). Eine optische oder spektrale Untersuchung ist nicht möglich.



**Abbildung 5.5:** Blockschaltbild für den Versuchsaufbau mit IEC-Funkenprüfgerät

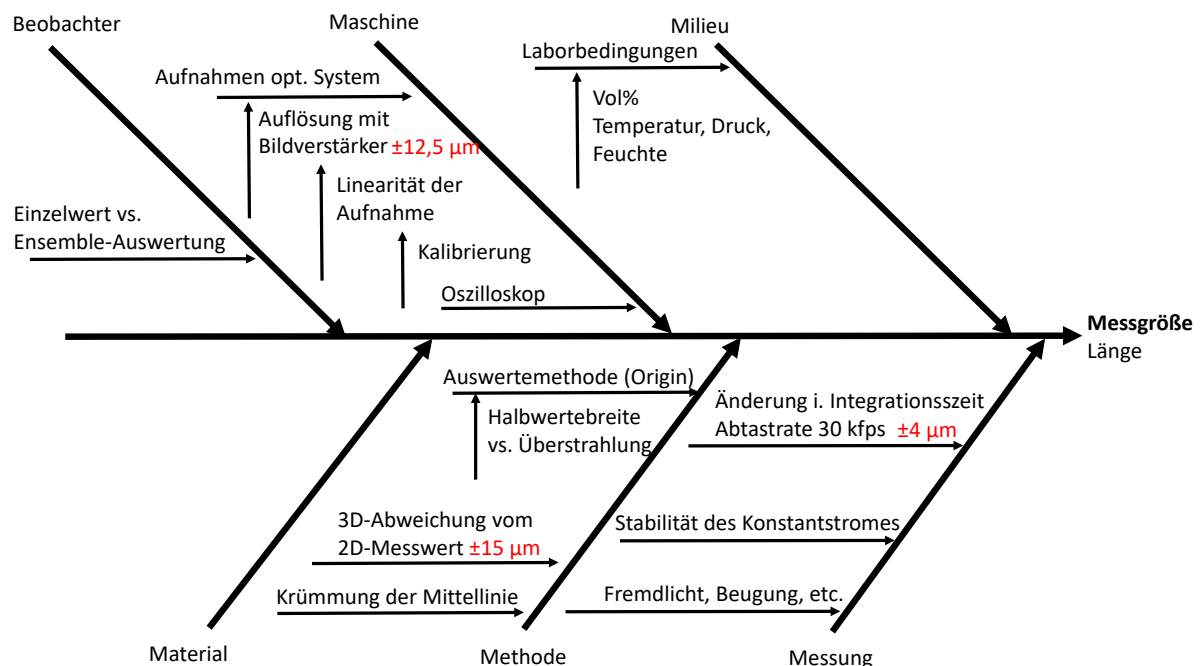
Für eine Beurteilung der Messergebnisse werden, sofern möglich, die Unsicherheitsintervalle abgeschätzt.

### 5.3 Messunsicherheit

Zu den in Kapitel 7.1 ermittelten Längen und Spannungen der Entladung sowie zu den in Kapitel 7.3 ermittelten Temperaturen wird die kombinierte bzw. erweiterte Messunsicherheit nach dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) [JOI95] angegeben.

Dabei werden die Einflüsse auf die Messwerte ermittelt bzw. abgeschätzt, das Modell bzw. die Modellgleichung für die Ergebnisgröße aufgestellt und der Schätzwert der Ergebnisgröße sowie die Messunsicherheit über die GUM Workbench<sup>16</sup> berechnet. Für die Strom-Spannungs-Kennlinie wird die erweiterte Messunsicherheit in einer kombinierten Form dargestellt. In der Strom-Spannungs-Kennlinie wird dabei ein Anteil als Messunsicherheit eines Messwertes in der Fehlerbalkendarstellung abgebildet und ein weiterer Anteil der Ausgleichsgeraden mit einer Hüllkurve nach der Methode der kleinsten Quadrate (Total Least Square Fit – TLS) errechnet. Hierbei geben nur beide Informationen gemeinsam die erweiterte Messunsicherheit wieder.

Für die Längenmessung der Entladung sind beispielhaft die Beiträge zur Messunsicherheit in folgendem Ursache-Wirkungs-Diagramm (auch Fischgräten- oder Ishikawa-Diagramm genannt) dargestellt (vgl. Abbildung 5.6).



**Abbildung 5.6:** Beispiel für ein Ursache-Wirkungs-Diagramm für die Längenmessung der Entladungen, vgl. [UHF18]

Die für die Messunsicherheit relevanten Beiträge sind die Auflösung des optischen Systems und der Beitrag bei der zweidimensionalen Messung der in der Wirklichkeit dreidimensionalen

<sup>16</sup> GUM Workbench Pro, Version 2.4.1.388, 1996 – 2010, Metrodata GmbH.

Entladung. Der Beitrag der optischen Auflösung zur Messunsicherheit mit  $\pm 12,5 \mu\text{m}$  (Rechteckverteilung) ist mit einem Auflösungsnormal ermittelt worden. Der Beitrag der tatsächlichen dreidimensionalen Entladung durch die zweidimensionale Messung wird über die Winkeländerung der Entladungsmittellinie während einer Entladung mit einem Längenbeitrag von  $\pm 15 \mu\text{m}$  ( $k=2$ ) abgeschätzt. Ebenfalls werden für die Ermittlung der Kennlinie die Beiträge durch die Integrationszeit der Aufnahme und für die Zuordnung der Spannung die Streuung der Messwerte sowie die Unsicherheitsbeiträge aus dem Kalibrierschein berücksichtigt. Bei der Spannungsmessung wird der Einfluss des sich kontinuierlich ändernden Kontaktwiderstandes auf den Spannungsoffset bei der Messunsicherheitsbetrachtung berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.1).

Die Messunsicherheiten der Ergebnisse sind entsprechend GUM [JOI95] aus den einzelnen Messunsicherheitsbeiträgen mit den entsprechenden Verteilungen (Normal, Rechteck etc.) und Gewichtungsfaktoren ermittelt. Die relevanten Messwerte basieren auf mindestens 15 Messreihen mit jeweils mehreren einzelnen Messwerten, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten. Die Daten für die Strom-Spannungs-Kennlinie mit dem TLS-Fit<sup>17</sup> sind mit einem Chi-Quadrat-Test auf Normalverteilung geprüft worden. Die erweiterte Messunsicherheit der Ergebnisse wird für eine Normalverteilung mit dem Überdeckungsfaktor  $k=1$  und  $k=2$  angegeben, d. h., 68,3 % und 95,5 % der Messwerte sind innerhalb der Grenzen. Damit wird eine Angabe zur Genauigkeit der Messergebnisse dieser Arbeit ermöglicht, um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse einschätzen zu können.

Die konkreten Abschätzungen der Messunsicherheitsbeiträge für die Spannungs-Entladungssäulen-Kennlinie und die UI-Kennlinie ist in Kapitel 7.1 dargestellt.

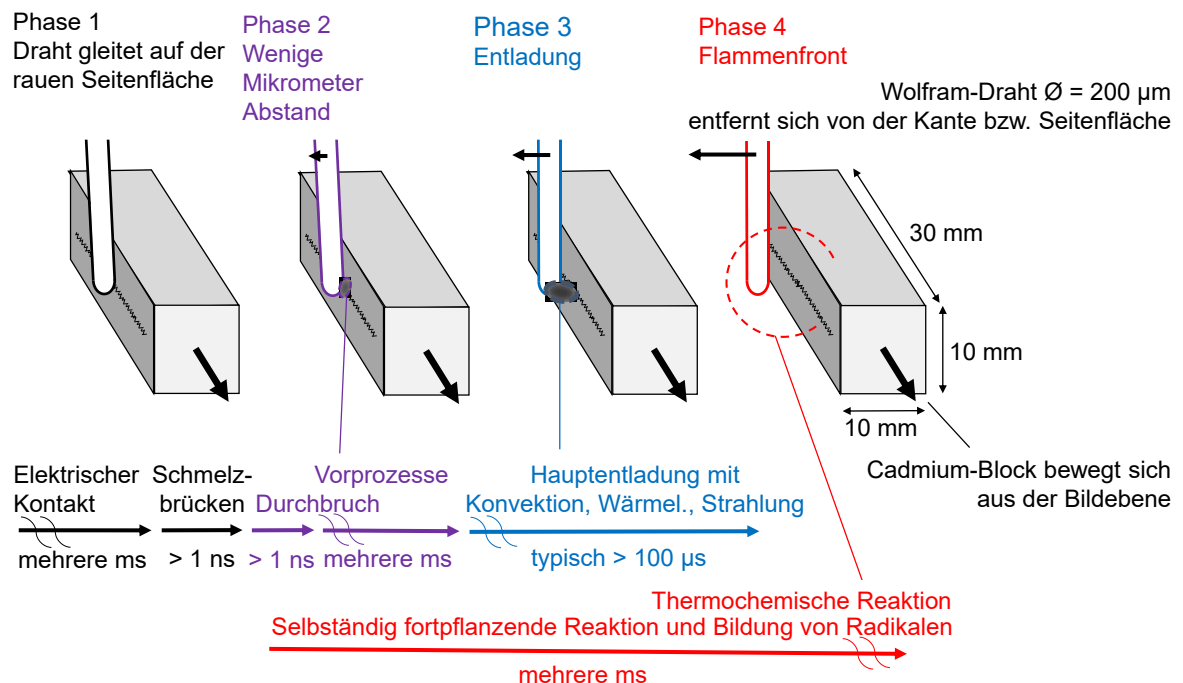
---

<sup>17</sup> Für die Ermittlung des TLS-Fits wurde ein Matlab-Tool von der PTB-Arbeitsgruppe 8.42 Datenanalyse und Messunsicherheit, Franko Schmähling zur Verfügung gestellt.

## 6 Einflussgrößen auf die Worst-Case-Situation

In diesem Abschnitt werden erst zusammenfassend die Prozesse während der Kontaktöffnungsvorgänge dargestellt, die in dieser Arbeit untersucht werden. Hinsichtlich der Aufgabenstellung werden anschließend die Untersuchungen der Worst-Case-Bedingungen und die zugehörigen Ergebnisse beschrieben.

Für die Separation von Effekten und Variation einzelner Parameter während der Untersuchungen folgt eine Gliederung der einzelnen Phasen des Öffnungsvorganges. Die Phasen sind für die Kontaktöffnungsvorgänge aller Kontaktapparaturen ähnlich und unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Bewegungsparameter. Die folgende Abbildung 6.1 zeigt beispielhaft die Phasen der Entladung bei einer Kontaktöffnung in der Kontaktvorrichtung 2.



**Abbildung 6.1:** Schematischer Ablauf der Vorgänge und Zeitauern bei einem langsamen Kontaktöffnungsvorgang in der experimentellen Kontaktvorrichtung 2, vgl. [USE17]

Bei einem Kontaktöffnungsvorgang findet zuerst ein elektrischer Kontakt zwischen dem Wolfram-Draht und der rauhen Seitenfläche statt. Der Draht gleitet dabei entlang der Oberfläche des Cadmium-Blockes (Phase 1), der sich mit ca.  $4 \text{ mm s}^{-1}$  bewegt. Anschließend entfernt sich der Draht um wenige Mikrometer senkrecht zur Oberfläche; sofern eine ausreichende elektrische Spannung anliegt, können für mehrere Millisekunden **Vorprozesse** stattfinden. Dabei finden bei einem sehr kleinen Elektrodenabstand viele kurze elektrische Entladungen statt (Phase 2). Diese Vorprozesse sind zurzeit noch Stand der Forschung. Bei einer weiteren Vergrößerung des Elektrodenabstandes auf typischerweise 100 bis 200  $\mu\text{m}$  finden die Hauptentladung (Phase 3) sowie die thermochemische Reaktion (Phase 4) statt.

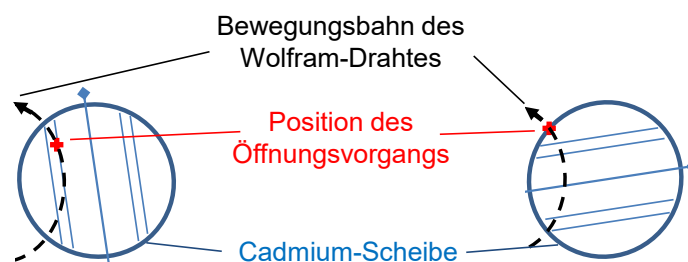
In den folgenden Kapiteln ist die Ermittlung der Worst-Case-Bedingungen der Entladungen mit den einzelnen Untersuchungen und Analysen der idealen Kontaktöffnungsbewegung, der idealen Elektrodenoberfläche und der geeigneten Konstantstromregelung dargestellt. Die Variation der Parameter erfolgt in mehreren Iterationsschritten, die jedoch nicht der Reihenfolge der Darstellung in dieser Arbeit entsprechen. Dafür wird jeweils der Stromwert reduziert und die einzelnen Parameter werden variiert und optimiert, bis zündfähige Entladungen an der Zündgrenze mit vergleichbaren Stromwerten wie beim IEC-Funkenprüfgerät erreicht werden. Diese bilden anschließend die Grundlage für die Charakterisierung der Entladungen.

## 6.1 Kontaktöffnungsbewegung

Die Öffnungsvorgänge der Elektroden treten im IEC-Funkenprüfgerät an verschiedenen Positionen und in vielfältigen Varianten auf. Für die Analyse der Kontaktöffnungsbewegung werden in diesem Abschnitt die mechanischen Zusammenhänge und relevanten Kontaktöffnungssituationen im IEC-Funkenprüfgerät dargestellt und dann wird die Worst-Case-Kontaktöffnungsbewegung der repräsentativen Entladung der Kontaktvorrichtung 2 aufgezeigt.

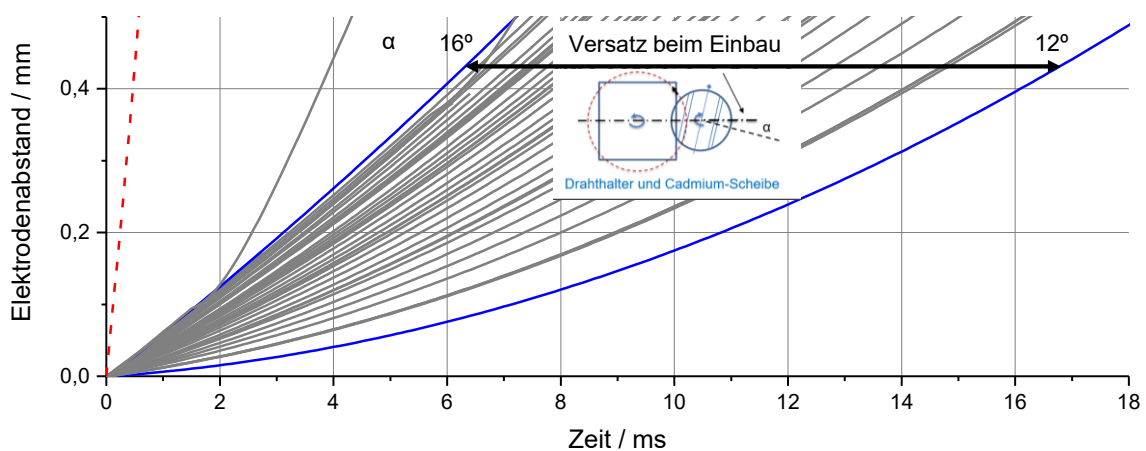
Die Kontaktöffnungsbewegung bestimmt durch ihre Geschwindigkeit die zeitliche Länge der Entladung und den Zeitpunkt des optimalen Energieeintrages. Bei größeren Elektrodenabständen und ausreichender Spannung können höhere Leistungen übertragen werden. Bei geringer Abständen beeinflussen Quenching-Verluste die Entladung [ZC74]. Ebenfalls ist eine geringe Beschleunigung, d. h. ein langsamer Übergang vom elektrischen Kontakt (Phase 1) zu den Vorprozessen (Phase 2) relevant, um erfolgreich eine elektrische Entladung zu initiieren [UHF18].

Die generelle Elektrodenbewegung wird durch die Mechanik des Funkenprüfgerätes vorgegeben. Detailliertere Angaben hierzu sind in der IEC 60079-11 im Anhang B [INT11] und die Zusammenhänge der Mechanik bei Thedens [THE02] und Vogt [VOG80] bzw. im Anhang A beschrieben. Dabei sind zwei offensichtliche Kontaktöffnungssituationen zu erkennen, die in der folgenden Abbildung 6.2 dargestellt sind.



**Abbildung 6.2:** Öffnungssituationen (rotes Kreuz) beim langsameren Entfernen von der Nutkante (links) und beim schnelleren Entfernen des Drahtes von der Scheibenkante (rechts).

Die schnellsten Kontaktöffnungen treten beim Entfernen des Drahtes senkrecht von der Kante auf, wenn der vorher gespannte Draht sich wieder entspannt (vgl. Abbildung 6.2 rechts). Je nach Überlappung des Drahtes zur Cadmium-Scheibe von Praxiswerten mit ungefähr 0,7 bis 1,2 mm beschleunigt der Draht beim Zurückbiegen auf Geschwindigkeiten von 26,8 bis 31,1 m s<sup>-1</sup> [ZAL06]. Langsamere und potenziell zündrelevantere Kontaktöffnungen treten auf, wenn der Draht auf seiner Bewegungsbahn in der Nut die Kante berührt und sich anschließend wieder von der Nutkante entfernt (vgl. Abbildung 6.2 links). Die Kontaktöffnungsgeschwindigkeit ist dabei von dem Versatz (Winkel  $\alpha$ ) des Drahthalters zur Cadmium-Scheibe abhängig. Die daraus resultierenden theoretischen Elektrodenöffnungsbewegungen sind in der folgenden Abbildung 6.3 dargestellt.

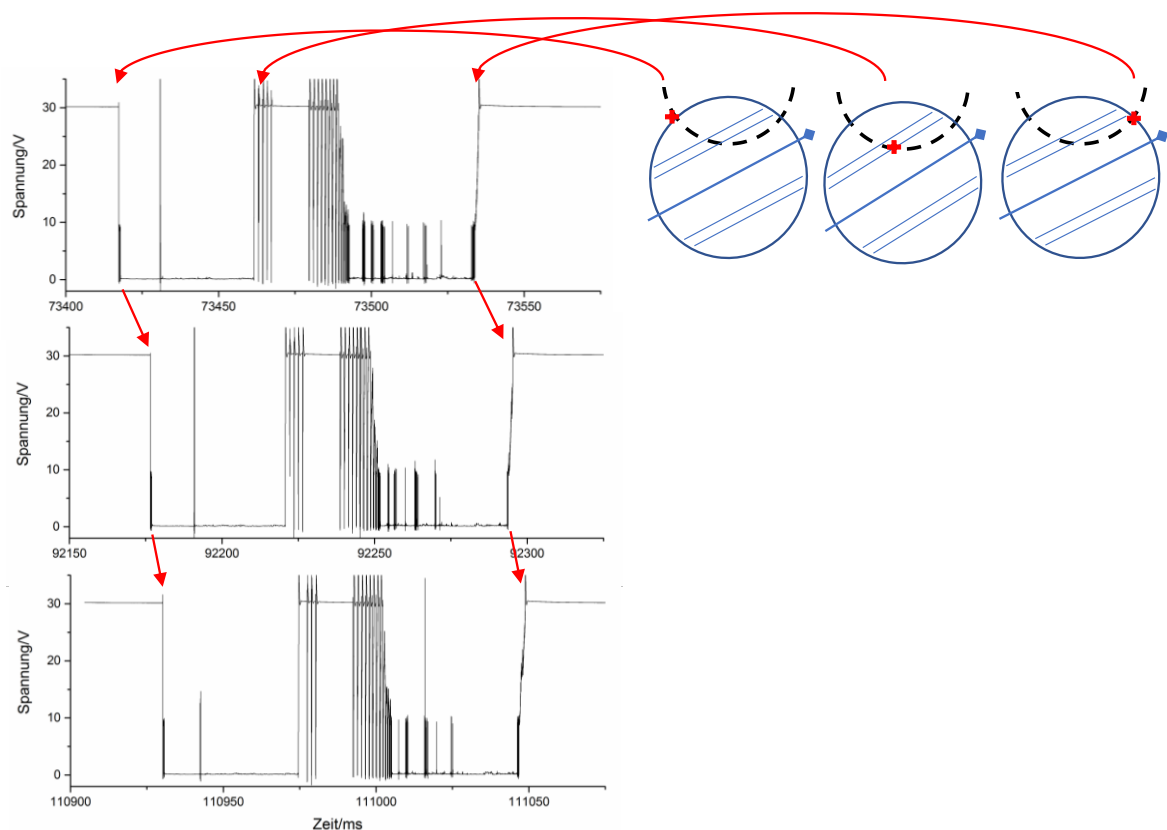


**Abbildung 6.3:** Verläufe des Abstandes bei schnellen Öffnungen (rot gestrichelt, gemessen) im Vergleich zu langsameren Öffnungen in der Nut (blau und grau, berechnet)

Abbildung 6.3 zeigt den gemessenen Verlauf des Elektrodenabstandes, wenn sich ein Wolfram-Draht mit einer Überlappung von 1 mm von der Kante entfernt und wieder in seine entspannte Form zurückbewegt (rot gestrichelter Verlauf, gemessen). Dieser Verlauf wurde an der Kontaktvorrichtung 1 gemessen. Der Elektrodenabstand vergrößert sich hier auf 200  $\mu$ m innerhalb eines sehr kurzen Zeitraumes von ca. 200  $\mu$ s. Im Diagramm sind auch die theoretischen Verläufe des Elektrodenabstandes beim Berühren des Drahtes an der Nutkante dargestellt (blau und grau, berechnet mittels MATLAB-Simulation, Variationen des Versatzes  $\alpha$  in 1° Schritten). Bei dieser langsameren Kontaktöffnung bewegt sich der Draht auf einen Abstand von 200  $\mu$ m in einem Zeitraum von 2,5 bis 11 ms. Verbogene Wolfram-Drähte mit anderen Bahnradien bewirken vergleichbare Effekte. Somit führen aufgrund dieser Variationen unterschiedliche Elektrodenkonfigurationen bzw. IEC-Funkenprüfgeräte sehr unterschiedliche Kontaktöffnungsbewegungen aus. In der Praxis können diese Bewegungen noch von Vibrationen und Prellen überlagert werden, die jedoch nicht mehr vorhersagbar sind [ZC74].



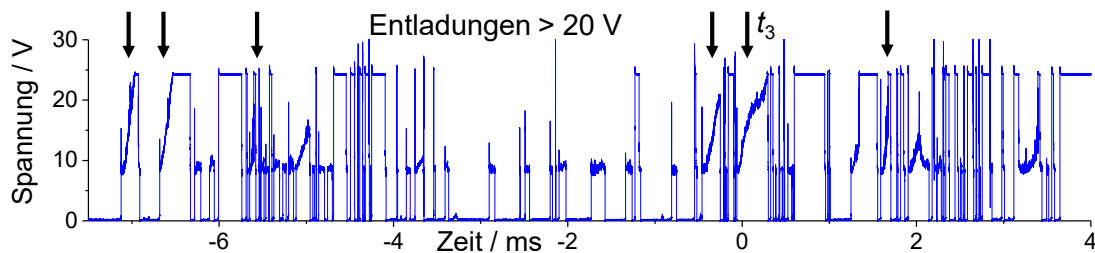
Wie in Kapitel 2.2 aufgeführt, gleitet der Draht für ca. 100 ms auf der Cadmium-Scheibe. Nach einer Unterbrechung von ca. 50 ms ohne elektrischen Kontakt folgt der nächste Draht, der versetzt über einen weiteren Kontaktweg der drehenden Scheibe gleitet. Nach 25 Kontaktvorgängen wird aufgrund der mechanischen Kopplung des Drahthalters und der Cadmiumscheibe (vgl. Kapitel 2.2) wieder der erste Kontaktweg genutzt und die Kontaktsituationen wiederholen sich. Dieses Wiederholen nach einem Vielfachen von 25 Kontaktvorgängen korreliert mit dem Auftreten von Zündungen bei Worst-Case-Situationen. Die Wiederholung des Kontaktwegs ist in den Spannungsverläufen zu erkennen (vgl. Abbildung 6.4).



**Abbildung 6.4:** Typischer Spannungsverlauf für den gleichen Kontaktvorgang nach je 25 Vorgängen (links) sowie die zugehörige Kontaktbahn über die Cadmium-Scheibe (rechts) (Drehung der Cd-Scheibe nicht dargestellt).

Die Abbildung 6.4 (links) zeigt ein Beispiel für die Wiederholung des Spannungsverlaufs. Am Anfang ist der negative Spannungssprung zu erkennen, wenn der Draht den elektrischen Kontakt mit der Scheibe schließt. In der Mitte des Verlaufes wird wieder die maximale Spannung erreicht, wenn sich der Draht in der Nut befindet. Ebenfalls sind dann diverse Situationen mit elektrischem Kontakt zu erkennen, sobald der Draht von der und gegen die Nutkante schwingt. Am Ende des Spannungsverlaufes steigt die Spannung wieder auf den Maximalwert, wenn der Draht die Scheibe verlässt. In der Abbildung rechts sind die korrespondierenden Positionen des Drahtes auf der Scheibe dargestellt.

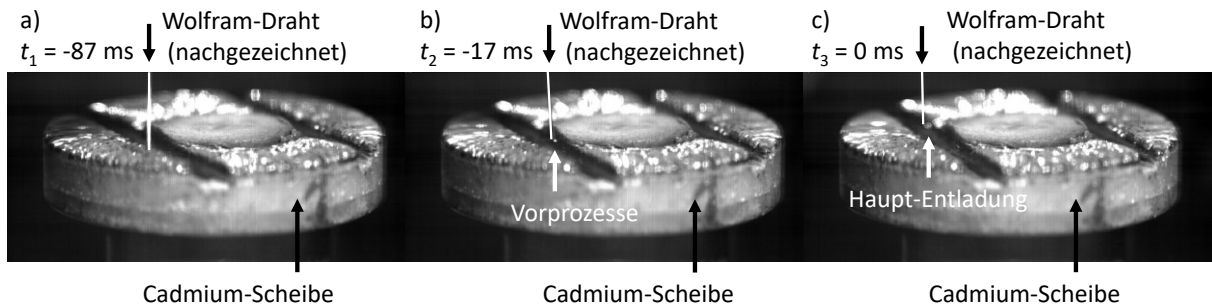
Potenziell zündrelevantere Kontaktöffnungen treten im IEC-Funkenprüfgerät auf, wenn sich der Draht entlang der Nutkante bewegt, da hier Worst-Case-Entladungen stattfinden. Ein typischer Spannungsverlauf dazu ist in der folgenden Abbildung 6.5 dargestellt.



**Abbildung 6.5:** Beispiel für einen Spannungsverlauf bei einer Drahtbewegung in der Nut des Funkenprüfgerätes (Ausschnitt der Viertel-Drehung des Drahthalters von 11 ms )

Im Spannungsverlauf in Abbildung 6.5 ist durch die diversen Spannungsanstiege (Pfeile) zu erkennen, dass in diesem Zeitraum mehrere Kontaktöffnungsvorgänge stattfinden, wenn sich der Draht entlang der Nutoberfläche bewegt. Die langsameren Spannungsanstiege können Unebenheiten bis ca. 200  $\mu\text{m}$  Tiefe zugeordnet werden. Die schnelleren Spannungsanstiege können von den Vibrationen und Prellen des Drahtes herkommen. Somit ist zu erkennen, dass bei einem Kontaktvorgang gemäß IEC 60079-11 [INT11], d. h. einer Vierteldrehung des Drahthalters, eine Vielzahl von Öffnungsvorgängen mit Entladungen auftreten. Bei höheren Stromwerten und damit höheren Leistungen werden die Entladungen stabiler und länger und können wahrscheinlicher eine Zündung bewirken. Dieser Verlauf verändert sich mit der Abnutzung der Oberfläche und ist somit für jede Oberfläche der Cadmium-Scheibe, d. h. für jedes IEC-Funkenprüfgerät, individuell. Die dadurch entstehende Streuung der Ergebnisse bei der Prüfung mit dem IEC-Funkenprüfgerät wurde bei dem bereits genannten Proficiency Testing Program ermittelt [KWK14].

Der grundsätzlichen Spannungsverläufe mit den Spannungsanstiegen verschiedener Cadmium-Scheiben sind jedoch ähnlich und die Oberflächen der Scheiben sind bzgl. der Rauheit prinzipiell vergleichbar. Während der Untersuchungen mit dem IEC-Funkenprüfgerät in dieser Arbeit tritt die Entladung an der Zündgrenze mit der Worst-Case-Situation immer an der gleichen Position auf (Zeitpunkt  $t_3 = 0$  ms in Abbildung 6.5). Diese Entladung beginnt im Spannungsverlauf ab dem Zeitpunkt  $t_3 = 0$  ms (Abbildung 6.5) und ist in den folgenden Aufnahmen in Abbildung 6.6 abgebildet.



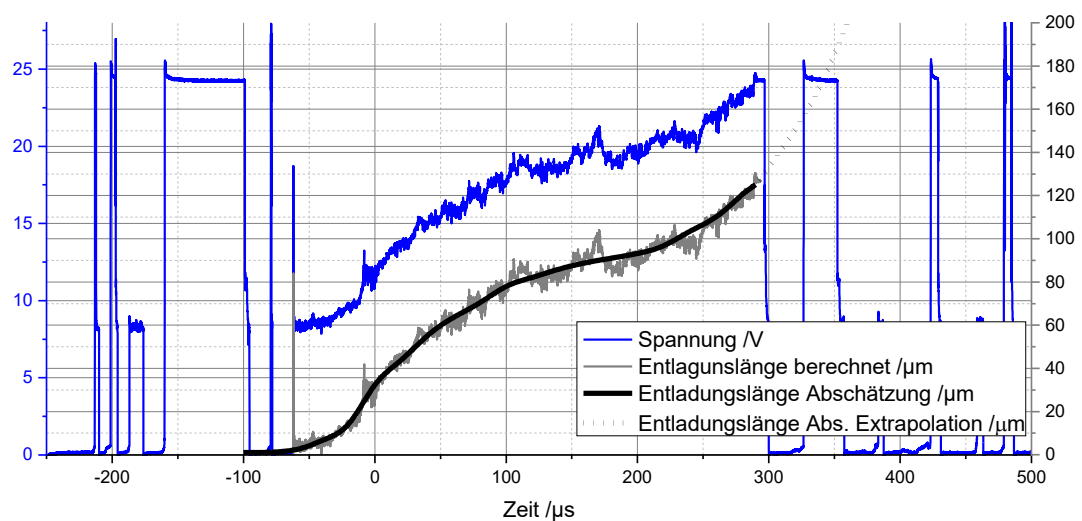
**Abbildung 6.6:** Bildfolge der langsamen Kontaktöffnung in der Nut mit folgender Zündung im Funkenprüfgerät

In der Bildfolge in Abbildung 6.6 sind die Positionen des Drahtes gegenüber der Cadmiu-Scheibe und in der Nähe der Drahtspitze bei a) und b) Entladungen zu erkennen, wenn

- a) der Draht auf die Cadmiu-Scheibe trifft,
- b) der Draht sich an der Nutkante bewegt und
- c) bei der anschließenden Kontaktöffnung eine Entladung auftritt, die die Zündung des Wasserstoff-Luft-Gemisches auslöst.

Bei b) berührt der Draht die Seitenfläche der rauen Nutkante und rechts unten von der Drahtspitze sind Vorprozesse zu erkennen, die über viele Millisekunden lang erzeugt werden. Die Hauptentladung c), die auch zur Zündung führt, findet außerhalb des Fokusbereiches statt, ist aber noch zu erkennen und mit einem Pfeil gekennzeichnet. In der entsprechenden Filmsequenz, die hier in dieser Form nicht dargestellt werden kann, sind die Hauptentladung wie auch die folgende Zündung deutlich zu erkennen.

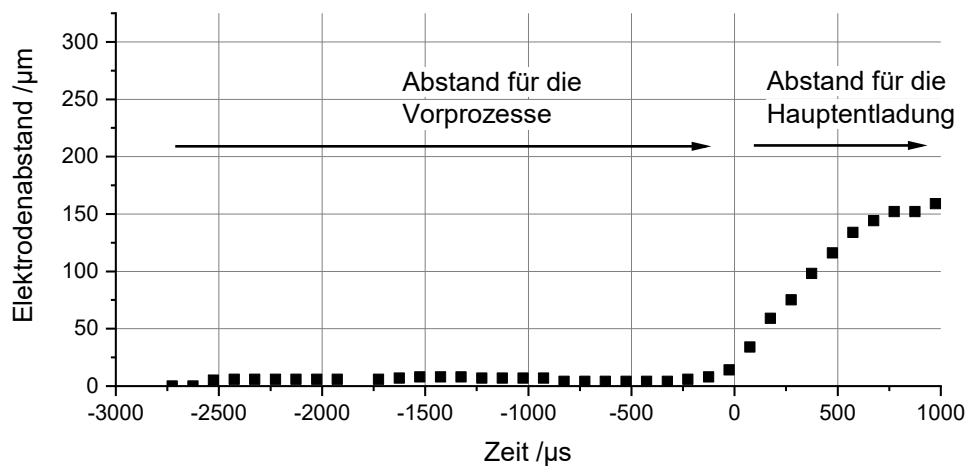
Die Kontaktöffnungsbewegung der Worst-Case-Entladung im Funkenprüfgerät kann über die ermittelte Strom-Spannungs-Kennlinie abgeschätzt werden (vgl. Kapitel 7.1). Damit ergibt sich der folgende Verlauf (vgl. Abbildung 6.7)



**Abbildung 6.7:** Abschätzung der Entladungslänge aus dem Spannungsverlauf einer Entladung im IEC-Funkenprüfgerät

Die Abbildung 6.7 zeigt den Verlauf der Entladungslänge für die Worst-Case-Entladung bei der Drahtbewegung in der Nut, die ca. 350  $\mu\text{s}$  andauert. Die Entladungslänge beträgt ca. 130  $\mu\text{m}$ . Aufgrund der sich ständig verändernden Oberfläche variiert die maximale Entladungslänge, insbesondere bei unterschiedlich abgenutzten Cadmium-Scheiben in verschiedenen Geräten. Vor diesem Hintergrund und in Relation zur Messunsicherheit werden die Werte der Entladungslänge und den Elektrodenabstand in diesen Untersuchungen als gleich angenommen. Auf detailliertere Zusammenhänge zwischen der Entladungslänge und dem Elektrodenabstand wird in Kapitel 7.1 eingegangen.

Die Kontaktöffnungsgeschwindigkeit der Worst-Case-Entladung entsprechend Abbildung 6.7 liegt im Bereich von 0,1  $\text{m s}^{-1}$  bis 0,6  $\text{m s}^{-1}$ . Dieser Verlauf ist eine Orientierung für die experimentelle Kontaktvorrichtung 2. Der in dieser Kontaktvorrichtung realisierte Elektrodenabstandsverlauf ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 6.8:** Verlauf des Elektrodenabstandes in der experimentellen Kontaktvorrichtung 2, vgl. [UHF18]

Der zeitliche Verlauf des Abstandes des Drahtes von der Oberfläche in Abbildung 6.8 ist über die Bewegung des Wolframdrahtes gemessen. Der Verlauf ist empirisch optimiert, um Zündungen mit geringsten Stromwerten zu erreichen. Am Anfang bewegt sich der Draht für mehr als 2,5 ms (-2 500 bis 0  $\mu\text{s}$ ) in einem sehr kurzen Abstand, um die sogenannten Vorprozesse zu ermöglichen, die in Kapitel 6.2 weiter diskutiert werden. Anschließend entfernt sich der Draht in ca. 1 bis 1,5 ms auf über 150  $\mu\text{m}$ , was einer Kontaktöffnungsgeschwindigkeit von ca. 0,2 bis 0,13  $\text{m s}^{-1}$  entspricht. Der Abstandswert unterliegt aufgrund von Drahtschwingungen, Mikropartikeln von mehr als 20  $\mu\text{m}$  Durchmesser und Materialabbrand Schwankungen.

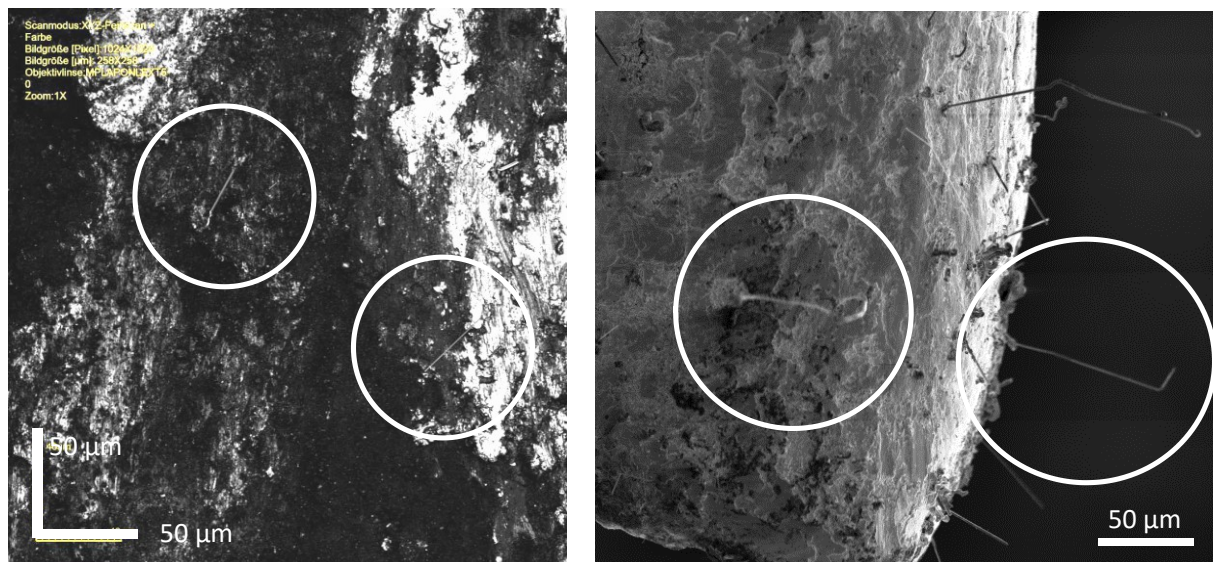
In diesem Abschnitt wird die Kontaktöffnungsbewegung für die Worst-Case-Entladung in der experimentellen Kontaktvorrichtung 2 gezeigt. Bei dieser langsamen Kontaktöffnung bewegt sich der Draht für wenige Millisekunden im Abstand von wenigen Mikrometern von der Oberfläche und entfernt sich dann mit einer Geschwindigkeit kleiner als 0,1  $\text{m s}^{-1}$  und

anschließend mit maximal  $0,2 \text{ m s}^{-1}$ . Die Verläufe variieren untereinander, sind aber prinzipiell ähnlich. Auf Basis dieser Worst-Case-Kontaktöffnungsbewegung werden nachfolgend die weiteren Bedingungen wie Rauheit, Vorprozessdauer und Verhalten der Stromquelle optimiert und die Charakteristiken ermittelt. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass im Zündgrenzbereich unter anderen Kombinationen von Bedingungen ähnliche Kontaktöffnungsbewegungen zu einer Zündung führen. Um alle sicherheitsrelevanten Situationen zu berücksichtigen, sollten für Simulationen neben diesem Verlauf sämtliche Parametervariationen mit Zuschlägen und Abzügen, d. h. schnellere und langsamere Variationen, verwendet werden. Die hier ermittelte Worst-Case-Kontaktbewegung wird als Basis für die Nachbildung der Worst-Case- Entladung an der Zündgrenze in Kapitel 7.4 weiter genutzt.

## 6.2 Elektrodenoberflächen und Vorprozesse<sup>18</sup>

Die Beschaffenheit der Elektrodenoberflächen hat einen relevanten Einfluss auf den Entladungsprozess, besonders auf die Bildung von Schmelzbrücken, die Erhöhung der elektrischen Feldstärke und die Bildung des Metaldampfplasmas. Um eine Entladung nahe der Zündgrenze erzeugen zu können, ist eine definierte Oberfläche mit einer bestimmten Rauheit erforderlich. In diesem Abschnitt werden charakteristische Oberflächen des Wolfram-Drahtes (Anode) und der Cadmium-Scheibe bzw. Cadmium-Blocks (Kathode) gezeigt sowie die Ergebnisse der Oberflächenuntersuchungen nach unterschiedlichen Vorbehandlungen der Oberfläche diskutiert.

Dafür werden von der Cadmium-Scheibe und dem Wolfram-Draht 3-D-Oberflächen mit einem konfokalen 3-D-Laser-Scanning-Mikroskop (CLSM)<sup>19</sup> und einem Rasterelektronenmikroskop<sup>20</sup> (REM) aufgenommen (vgl. Abbildung 6.9).



**Abbildung 6.9:** Aufnahmen der stark beanspruchten Oberfläche der Cadmium-Scheibe (links) und des Wolfram-Drahtes (rechts). Beide Aufnahmen zeigen Whisker auf der Oberfläche (mit Kreis markiert), vgl. [USF17]

Die Aufnahmen in Abbildung 6.9 zeigen raue Oberflächen einer stark beanspruchten Cadmium-Scheibe des Funkenprüfgerätes mit mehreren Millionen Kontaktvorgängen sowie die Oberfläche einer Spitze eines typischerweise verwendeten Wolfram-Drahtes. Auf beiden Oberflächen sind bis zu 100 µm lange und ca. 1 µm dicke Whisker zu erkennen, vgl. [NAS17]. Für die Untersuchung hinsichtlich der materiellen Zusammensetzung der Oberflächen wird ebenfalls ein Rasterelektronenmikroskop<sup>21</sup> genutzt. Die Analyse der Oberfläche der Cadmium-

<sup>18</sup> Teile dieses Abschnitts sind in Uber et al. [UHF18] und Uber et. al. [USG17] erschienen.

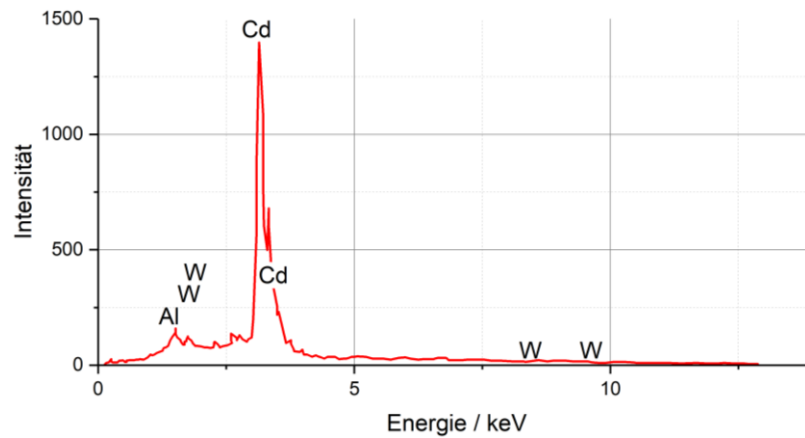
<sup>19</sup> Konfokales 3-D-Laser-Scanner-Mikroskop Olympus LEXT OLS4100.

<sup>20</sup> Rasterelektronenmikroskop JOEL – JSM6300F.

<sup>21</sup> Rasterelektronenmikroskop Zeiss Supra 40 FEG.



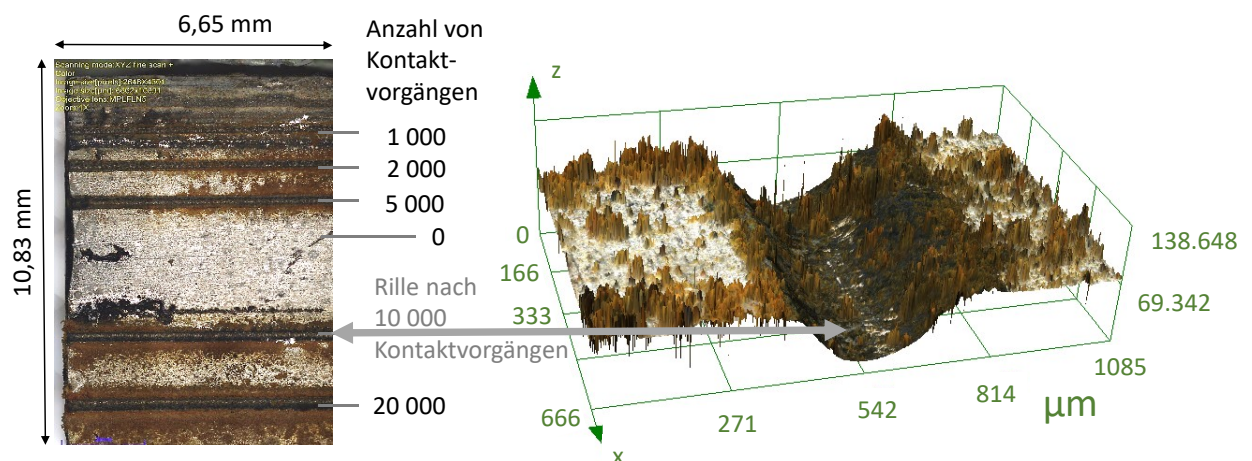
Scheibe zeigt erwartungsgemäß Cadmium. Der Wolfram-Draht hingegen weist eine von Cadmium ummantelte Oberfläche (vgl. Abbildung 6.10) mit Whiskern auf, welche ebenfalls aus Cadmium bestehen.



**Abbildung 6.10:** Elementanalyse der Oberfläche eines stark beanspruchten Wolfram-Drahtes. Anteil Cadmium ca. 80 %, Anteil Wolfram ca. 8 %, Anteil Aluminium ca. 8 %, vgl. [USF17]

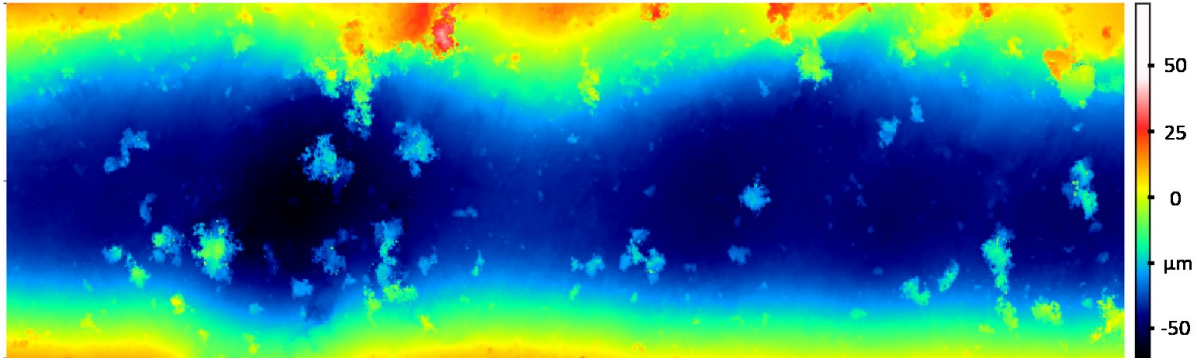
Die Elementanalyse der Drahtoberfläche bestätigt, dass diese im Wesentlichen mit Cadmium beschichtet ist. Als Ursache werden die Vorgänge mit den Schmelzbrücken und Metaldampfentladungen angenommen. Zusätzlich zum Anodenmaterial Wolfram ist Aluminium zu finden, welches ggf. von der Explosionskammer oder den weiteren Komponenten in der Explosionskammer stammen könnte.

Für die Charakterisierung der Oberfläche zur Erzeugung einer Worst-Case-Entladung und für vergleichbare Versuchsbedingungen werden verschiedene Oberflächen der Kathode (Cadmium) verglichen. Dafür wurden sechs ausgewählte Zonen mit je einer Rille auf einer ungenutzten Oberfläche mit einer definierten Anzahl von Kontaktvorgängen mit Konstantstrom von 60 mA und maximal 30 V behandelt (vgl. Abbildung 6.11). Eine ähnliche Form der Behandlung wird auch in der Norm aufgeführt (vgl. Kapitel 2.2).



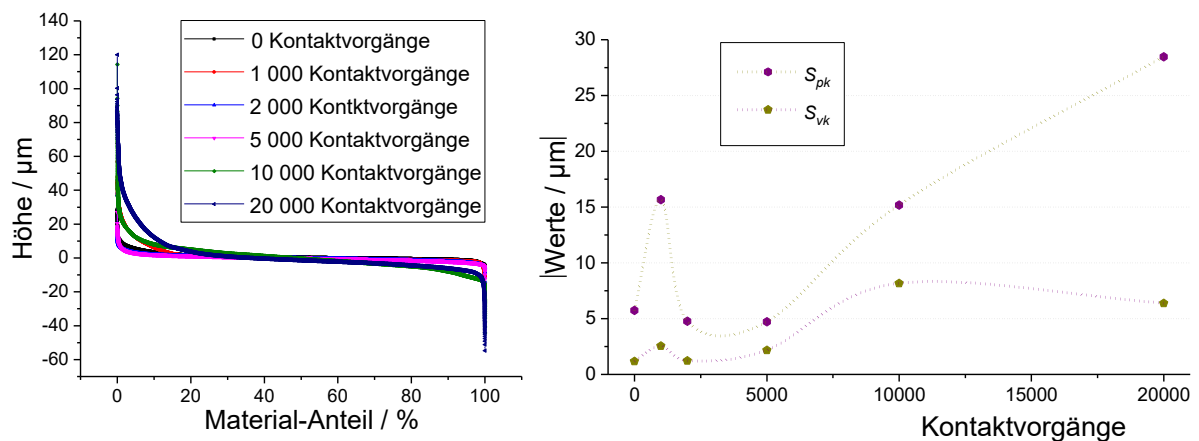
**Abbildung 6.11:** Ausschnitt der Cadmium-Oberfläche mit 5 vorkonditionierten Rillen (links); 3D-Ansicht der Oberfläche nach 10 000 Kontaktvorgängen (rechts), vgl. [UHF18]

Einen Abschnitt der Oberflächenstruktur in 3-D-Ansicht (2-fach überhöht) nach einer Vorkonditionierung mit 10 000 Kontaktvorgängen zeigt Abbildung 6.11. Die entstandene Höhenstruktur der Oberfläche weist eine Rille mit Vertiefungen und Partikelmaterialablagerungen auf (vgl. Abbildung 6.12).



**Abbildung 6.12:** Fremdfarbandarstellung der Rillenoberfläche nach einer Vorkonditionierung mit 10 000 Kontaktvorgängen mit Vertiefungen und Partikelablagerungen, vgl. [UHF18]

Die charakteristische Rauheit von Oberflächen kann unter anderem über Abbott-Kurven und die Parameter  $S_{pk}$  und  $S_{vk}$  charakterisiert werden. Die Abbott-Kurve gibt den Materialanteil für die korrespondierende Höhe an. Die linke Seite der Abbott-Kurve quantifiziert den Anteil der Erhöhungen bzw. Spitzen ( $S_{pk}$ ) und die rechte Seite entspricht dem Anteil der Vertiefungen ( $S_{vk}$ ). Die Abbott-Kurven und die Parameter  $S_{pk}$  und  $S_{vk}$  sind in der Abbildung 6.13 dargestellt.



**Abbildung 6.13:** Abbott-Kurven (links) und Rauheitskennwerte (rechts) der untersuchten Cadmiumoberflächen in Abhängigkeit der Vorkonditionierung, vgl. [UHF18]

Für die Oberflächen in der Rille, die mit 1 000, 10 000 und 20 000 Kontaktvorgängen vorkonditioniert ist, wird ein höherer Rauheitskennwert  $S_{pk}$  ermittelt. Dieses bedeutet einen höheren Volumenanteil an Spitzen bzw. Erhebungen, der auf der linken Seite der Abbott-Kurve in Abbildung 6.13 (links) grafisch dargestellt ist. Bei der optischen Analyse dieser Regionen (Abbildung 6.11 rechts) fällt deutlich eine bräunliche Färbung der Spitzen der Oberfläche und an Mikropartikeln in den Vertiefungen der Rille auf. Diese heben sich von den metallisch glänzenden Farben des Cadmiums optisch ab und können laut Literatur dem Cadmiumoxid

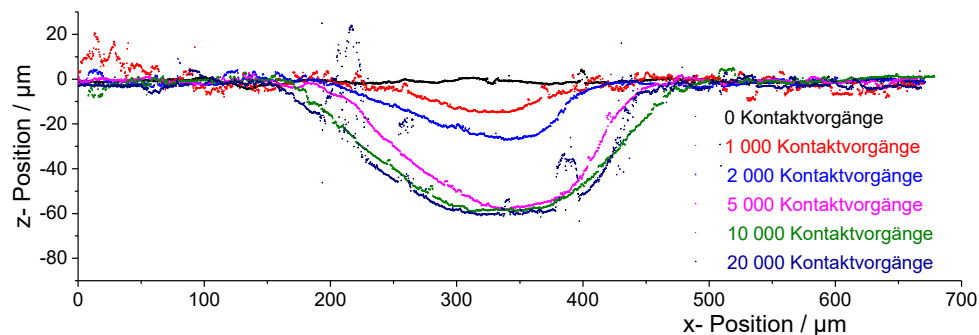


zugeordnet werden (vgl. [ZC74]). Die mit 10 000 und 20 000 Kontaktvorgängen vorkonditionierten Rillen zeigen höhere Werte von  $S_{vk}$ , die Vertiefungen in der Rille bedeuten. Diese Vertiefungen, in denen Ansammlungen von Partikeln zu sehen sind, sind ebenfalls in Abbildung 6.12 erkennbar.

Die Rauheitsparametern  $S_{pk}$  und  $S_{vk}$  zeigen für eine Vorkonditionierung mit 2 000 und 5 000 Kontaktvorgängen auffällig geringe Werte. Die Werte für die Rauheitsparameter steigen bis 1 000 Kontaktvorgänge an und nehmen mit steigender Anzahl bis 5 000 Kontaktvorgänge durch beispielsweise evtl. Glättungseffekte wieder ab. Ab 10 000 Kontaktvorgänge nehmen die Rauheitsparameter wieder signifikant zu. Die Ursache kann auf dem Einfluss des Elektrodenabstandes beruhen, da bei kleinem Elektrodenabstand (<1 000 Kontaktvorgänge) überwiegend mechanische Prozesse und bei einem größeren Elektrodenabstand (>5 000 Kontaktvorgänge) durch die Rillenbildung vermehrt elektrische Entladungen stattfinden.

Ein Anstieg der Rauheitsparameter  $S_{pk}$  und  $S_{vk}$  bei stärker abgenutzten Elektroden und längeren Vorprozesszeiten wurde ebenfalls bei vorangegangenen Untersuchungen beobachtet [USF17]. Die hier festgestellten Partikel und Mikrospitzen können den Entladungsprozess einerseits durch elektrische Felderhöhung und andererseits durch die Bildung von Mikroflächen mit Schmelzbrücken beeinflussen (vgl. Kapitel 3.1)

Das Profil von Rillen in Abhängigkeit der Vorkonditionierung ist in Abbildung 6.14 dargestellt.

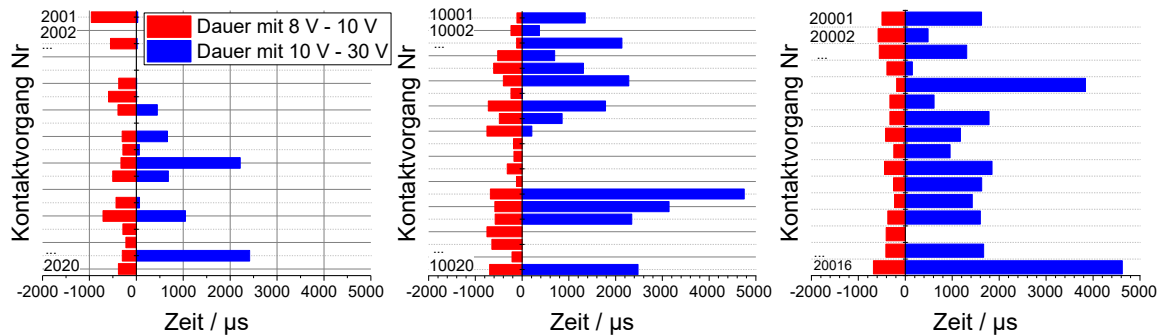


**Abbildung 6.14:** Beispiele von Rillenprofilen in Abhängigkeit der Vorkonditionierung, vgl. [UHF18]

Die in Abbildung 6.14 maximalen Tiefen dieser Rillen steigen mit zunehmender Anzahl der Kontaktvorgänge bis 5 000 Kontaktvorgänge. Ab 5 000 Kontaktvorgänge verändert sich die Tiefe unmerklich, jedoch nimmt die Breite des Profils zu.

Die geeignete Rauheit ist entscheidend für die Erzeugung einer zündfähigen Entladung. Die Häufigkeit und die Dauer von Entladungen sind maßgeblich sowohl vom Zustand (Rauheit) der Oberfläche der Kathode als auch von der Anode abhängig. Für die Untersuchung dieses Zusammenhanges wird die Cadmiumoberfläche der experimentellen Kontaktvorrichtung, wie bei der Rauheitsermittlung beschrieben, mit 1 000, 2 000, 5 000, 10 000 und 20 000 Kontaktvorgängen vorkonditioniert und die Zeitdauer der Entladungen ermittelt. Der Einfluss

der Anzahl von Kontaktvorgängen auf die Zeitdauer der Entladungen ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 6.15:** Dauer der Vorprozesse (rot) und der Hauptentladung (blau) nach 2 000 (links), nach 10 000 (Mitte) und 20 000 Kontaktvorgängen (rechts), vgl. [UHF18]

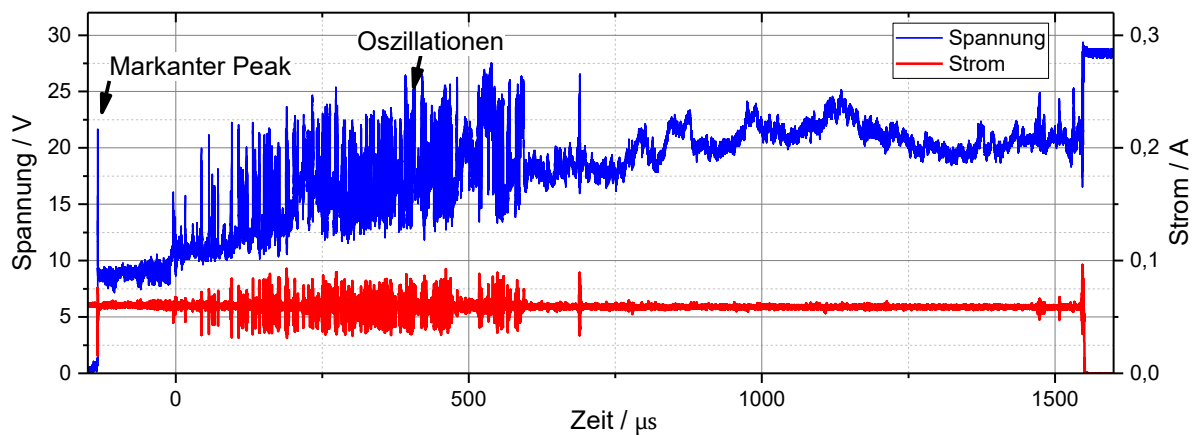
Die Zeitdauer der Entladungen wird über die Messung der Zeitdauer der korrespondierenden Spannungsbereiche 8 bis 10 V für den Vorprozess (vgl. Phase 2, Abbildung 6.1) und den korrespondierenden Spannungsbereich 10 bis 30 V für den Hauptprozess (vgl. Phase 3, Abbildung 6.1) ermittelt. Die längsten Entladungsdauern von mehr als 4 ms ergeben sich ab einer Vorkonditionierung mit 5 000 Kontaktvorgängen. Bei Vorkonditionierungen mit weniger Kontaktvorgängen werden kürzere maximale Entladungsdauern gemessen, bei der die Entladung wesentlich vor dem Erreichen des maximalen Elektrodenabstandes zusammengebrochen ist, was im Oszillogramm sichtbar ist. Vergleichbares ist auch bei vorangegangenen Untersuchungen der Entladungen beim Abspringen von der Kante bei der Kontaktvorrichtung 1 ermittelt worden [USG17]. In der Norm IEC 60079-11 [INT11] wird ebenfalls eine Vorkonditionierung bei den Versuchen mit dem IEC-Funkenprüfgerät aufgeführt. Vergleichbare Effekte der Elektrodenrauheit auf die Entladungen sind auch aus Untersuchungsergebnissen, beispielsweise von Cernak [CVM95] oder von Slade [SLA08], bekannt.

In den folgenden Untersuchungen wird, aufgrund der höheren Rauheitsparameter ab einer Vorkonditionierung von 10 000 Kontaktvorgängen, immer eine Vorkonditionierung von mindestens 10 000 Kontaktvorgängen durchgeführt.

Weiterhin erfolgt vor den Experimenten eine „Aktivierung“ der Oberfläche mit Kontaktvorgängen bei einer Spannung von 30 V für eine Dauer von 5 Minuten. Diese „Aktivierung“ ist insbesondere für die Erzeugung zündfähiger Entladungen Voraussetzung. Eine vergleichbare Aktivierung ist ebenfalls in der Norm IEC 60079-11 [INT11] erwähnt und in diesen Versuchen empirisch bestätigt. Die Ursache der Wirkung dieser „Aktivierung“ bedarf weiterer Untersuchungen des Plasmas und der elektrischen Kontaktvorgänge (vgl. Kapitel 9 Ausblick).

### 6.3 Spannungsquelle mit Konstantstromregelung

Ein besonderes Merkmal der untersuchten Entladungen ist der Spannungsverlauf mit überlagerten hochfrequenten Oszillationen. Grakov [GRA67] gibt beispielsweise für seine Messungen am Cadmium als Kathodenfallspannung 8,6 V bis 10,2 V an, d. h., der Spannungswert schwankt um  $\pm 0,8$  V. Die Amplitude dieses Signales wird von der Bandbreite der Messmittel bestimmt. Um in den Experimenten den relevanten Verlauf für die Ermittlung der Strom-Spannungs-Kennlinie zu erhalten, wird ein Tiefpassfilter<sup>22</sup> verwendet. Das Spannungssignal ohne Tiefpassfilter zeigt Abbildung 6.16.



**Abbildung 6.16:** Beispiel für einen gemessenen Spannungsverlauf einschließlich eines markanten Peaks (bei ca. -130  $\mu$ s) und Oszillationen einer Entladung in Luft (max. 30 V, 60 mA)

Ergänzend ist in Abbildung 6.16 der bei diesen Entladungen auftretende markante Peak zu erkennen, wenn der elektrische Kontakt in die Vorprozesse übergeht (Zeitpunkt -130  $\mu$ s). Dabei zeigt sich, dass diese Oszillationen und der markante Peak erforderlich sind, um zündfähige Entladungen, d. h. ausreichend lange Entladungen, zu erhalten.

Von Vakuumentladungen mit wesentlich höheren Strömen im Kiloampere-Bereich sind Spannungsverläufe mit hochfrequenten Oszillationen bekannt, die beim kontrahierenden Bogen der Bildung von Anodenfußpunkten zugeschrieben wird [LIP03]. Cernak [CVM95] ermittelte Rauheit mit folgender Metaldampfbildung als wesentliche Ursache für einen solchen markanten Peak am Anfang, der zeitlich längere Entladungen bewirkt. In der weiteren Literatur finden sich auch diverse Untersuchungen zu Mikrosekundenentladungen, deren Eigenschaften diesen Entladungen ähnlich sind (z. B. [JMB17]).

Für die Erzeugung der zündfähigen Entladungen in dieser Arbeit ist zwingend eine Spannungsquelle mit Konstantstromregelung erforderlich, die bei Spannungspeaks und Oszillationen der Spannung den Strom geeignet nachregelt, um stabile Entladungen zu erzeugen.

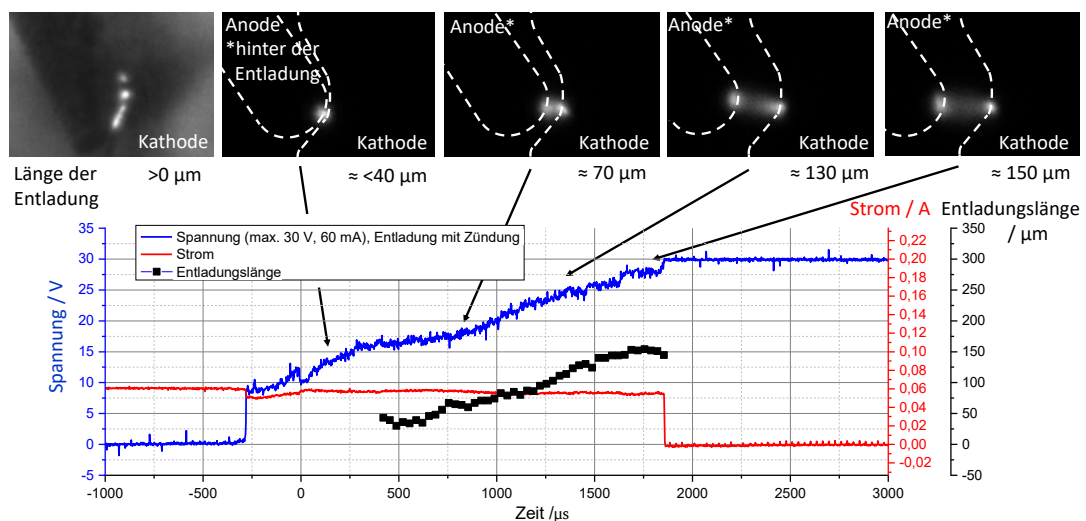
<sup>22</sup> Eingestellte Grenzfrequenz 1 MHz

## 7 Charakterisierung der Entladung

Bei den Untersuchungen mit der Zielstellung der elektrischen Charakterisierung von Worst-Case-Entladungen werden in dieser Arbeit die Entladungen mit der Kontaktvorrichtung 2 bei einer maximalen Spannung von 30 V und mit definierten Stromwerten im Zündgrenzbereich erzeugt. Die Strom-Spannungs-Kennlinien werden durch die optische Messung der Entladungslängen und der zugehörigen elektrischen Werte gemessen. Die Ermittlung des Spektrums und die Temperaturbestimmung erfolgen über optische Emissionsspektroskopie mit einem Gitterspektrometer. Die Zündkriterien werden ermittelt, indem Entladungen mit definiertem Konstantstromwert, einer zusätzlichen Begrenzung der Leistung und einer Reduzierung der Spannung erzeugt und ausgewertet werden. Bei den vorgenannten Messungen mit der Kontaktvorrichtung 2 werden die Häufigkeit der Zündung und zum Vergleich die Zündwahrscheinlichkeit mit dem IEC-Funkenprüfgerät bestimmt.

### 7.1 Strom-Spannungs-Kennlinie<sup>23</sup>

Der Zusammenhang zwischen der Spannung, dem Strom und dem Elektrodenabstand der Entladungen in Wasserstoff-Luft-Gemisch ist mit dem in Kapitel 5 beschriebenen Versuchsaufbau ermittelt. Zeitgleich mit der Aufnahme der elektrischen Werte der Entladung über das Oszilloskop erfolgten Aufnahmen der sehr kleinen, lichtschwachen und kurzen Entladungen im Mikrometerbereich über das Fernfeldmikroskop, einen Bildverstärker sowie mit der Hochgeschwindigkeitskamera mit einer Bildrate von 33000 fps. Den Zusammenhang von Entladungslänge, Stromverlauf und Spannungsverlauf zeigt das Beispiel in Abbildung 7.1.



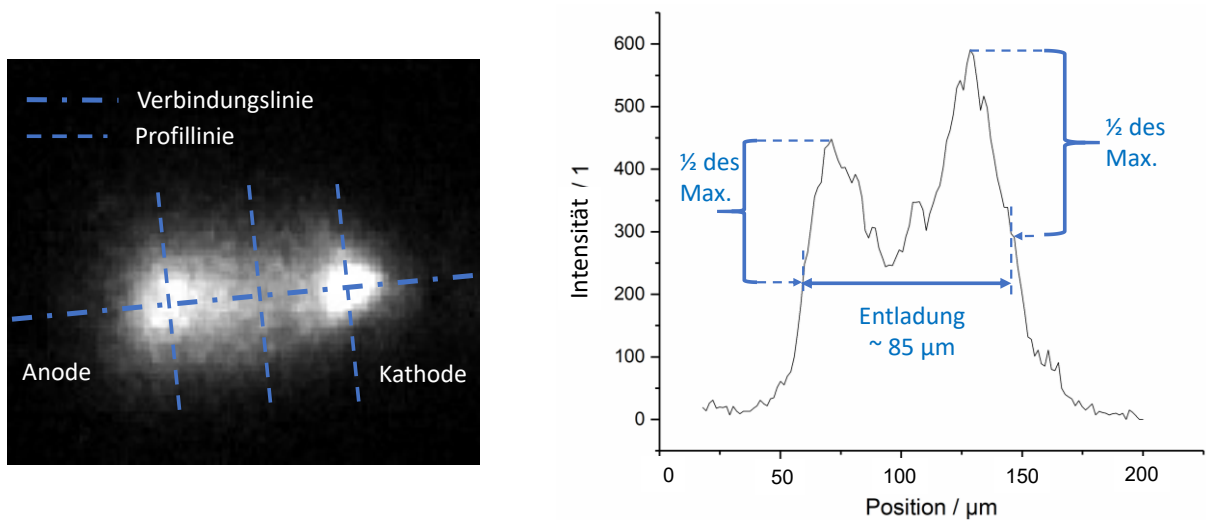
**Abbildung 7.1:** Bildfolge (oben), Stromverlauf (rot), Spannungsverlauf (blau), Entladungslänge (schwarz) einer elektrischen Entladung bei einer Kontaktöffnung mit Zündung, vgl. [UHF18]

<sup>23</sup> Teile dieses Abschnitts sind in Uber et al. [UHF18] und Uber et al. [USG17] erschienen.

In der Abbildung 7.1 (oben) sind die Aufnahmen eines Entladungsvorganges mit 60 mA Konstantstrom und einer max. Spannung von 30 V zu sehen. Vom Anfang der Entladung bis zum Zeitpunkt 0  $\mu\text{s}$  sind viele kurzlebige Entladungen nebeneinander zu erkennen. Ob diese Entladungen gleichzeitig oder nacheinander auftreten und aufgrund der Belichtungszeit nebeneinander abgebildet sind, muss in zukünftigen Untersuchungen ermittelt werden. Das linke Bild ist aus einer anderen Messreihe mit Beleuchtung aufgenommen, um die Konturen der Elektroden abschätzen zu können. Für die Orientierung sind in den folgenden Bildern die Konturen der Cadmium-Kante und des Wolfram-Drahtes skizziert. Die Entladung ist vor den Elektroden sichtbar. Ebenfalls ist die größere Kontakt- bzw. Elektrodenfläche durch die tiefere Rille zu erkennen, die sich nach einer Vorkonditionierung mit 10 000 Kontaktvorgängen bildet (vgl. Kapitel 6.2). Im weiteren Verlauf ist eine Entladung mit einer Lichterscheinung zu sehen, die mit größer werdendem Elektrodenabstand in eine längliche Entladung mit zwei strahlungsintensiveren Regionen im Anoden- und Kathodengebiet übergeht. Am Ende dieses Vorganges zeigt sich eine stärkere Strahlungsintensität in der Kathodenregion, bis die Entladung zusammenbricht. Dabei wechseln die Fußpunkte der Entladung teilweise sprunghaft Ihre Position.

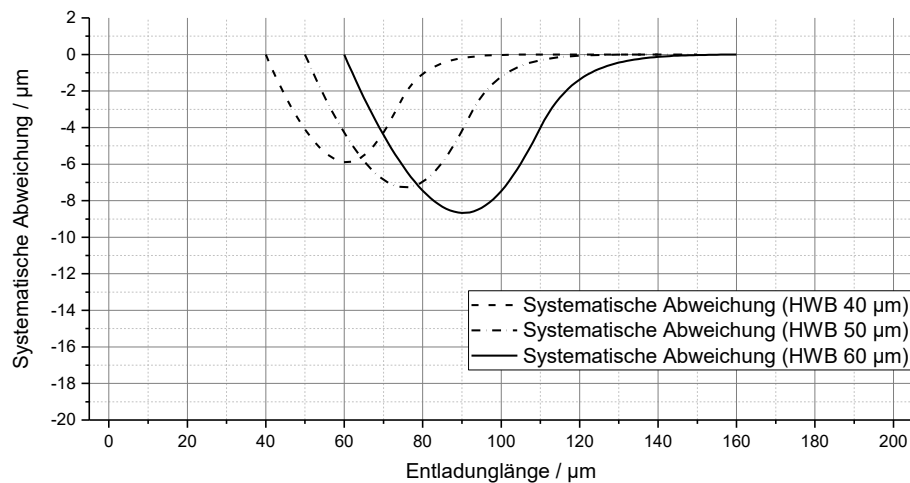
Unter den Aufnahmen sind der zugehörige Spannungs- und Stromverlauf sowie die Entladungslänge dargestellt. Nachdem zum Zeitpunkt -300  $\mu\text{s}$  der elektrische Kontakt abreißt, springt die Spannung auf die Fallspannung, die der minimalen Kathodenfallspannung von 8,6 V von Grakov [GRA67] entspricht. Mit größer werdendem Elektrodenabstand steigt die Spannung entsprechend an. Der Stromverlauf ist annähernd konstant und zeigt die Stabilität der genutzten Konstantstromregelung. Der **Zeitpunkt 0  $\mu\text{s}$**  im Spannungsverlauf der Entladungen definiert, wenn der Spannungswert nicht mehr unter 10 V fällt. Dies ist ungefähr der Übergangsbereich zwischen den Vorprozessen und der Hauptentladung (vgl. Abbildung 6.1).

Die Entladungslänge wird auf der Basis einer Verbindungslinie zwischen den strahlungsintensiven Anoden- und Kathodenregionen ermittelt. Die Länge ergibt sich dann zwischen den Endpunkten, die über den halben Maximalwert der Strahlungsintensität der jeweiligen hellsten Regionen definiert werden. Sofern kein Maximum erkennbar ist, wird der verbleibende Absatz im Strahlungsintensitätsverlauf, der sich in ca. 20  $\mu\text{m}$  Entfernung vom Entladungsende befindet, als Endpunkt angenommen. Die Breite wird über die rechtwinklig zur Verbindungslinie angeordneten Profillinien abgeschätzt, bei denen zur Bestimmung der Breite ebenfalls die Endwerte des halben Maximalwertes der Strahlungsintensität genutzt werden. Aus diesen Einzelwerten wird ein Mittelwert der Entladungsbreite gebildet (vgl. Abbildung 7.2).



**Abbildung 7.2:** Positionierung der Linien für die Vermessung der Entladung (links); Methode der Längenermittlung aus dem Intensitätsprofil der Verbindungslinie (rechts), vgl. [UHF18]

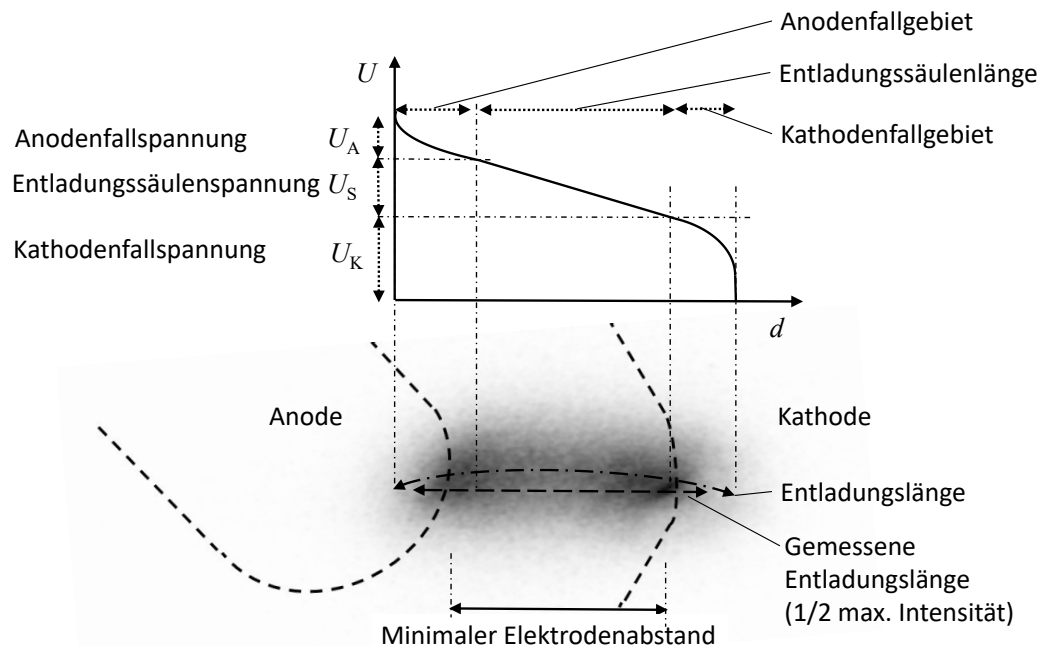
Mit dieser Auswertemethode ergibt sich eine systematische Abweichung durch überlagernde Strahlungspeaks, die von der Distanz zwischen den Peaks und somit von der Entladungslänge abhängig ist (vgl. Abbildung 7.3).



**Abbildung 7.3:** Systematische Abweichung aufgrund des Auswerteverfahrens, ermittelt auf der Basis von zwei sich überlagernden idealen Normalverteilungen

Abbildung 7.3 zeigt die numerisch berechnete systematische Abweichung aufgrund der Auswertemethode in Abhängigkeit des Abstandes der Normalverteilungen (Maxima). Dabei werden zwei ideale Normalverteilungen überlagert und die Differenz zwischen dem Abstand der Maxima und der über die Auswertemethode ermittelten Länge wird berechnet. Eine Korrektur der Werte erfolgt nicht, da in Anbetracht der Längenabhängigkeit des Fehlers eine längenabhängige Korrektur erfolgen müsste. Aufgrund der Größe der systematischen Abweichung in Relation zur Messunsicherheit der Länge der Entladung nach GUM wird die systematische Abweichung deshalb nicht für die Bestimmung der Entladungslänge berücksichtigt.

Den Zusammenhang von gemessenen Entladungslänge und Entladungssäulenlänge sowie Elektrodenabstand zeigt Abbildung 7.4.



**Abbildung 7.4:** Schematische Zusammenhänge der gemessenen Entladungslänge zur gesamten Entladungslänge, Entladungssäulenlänge und zum Elektrodenabstand

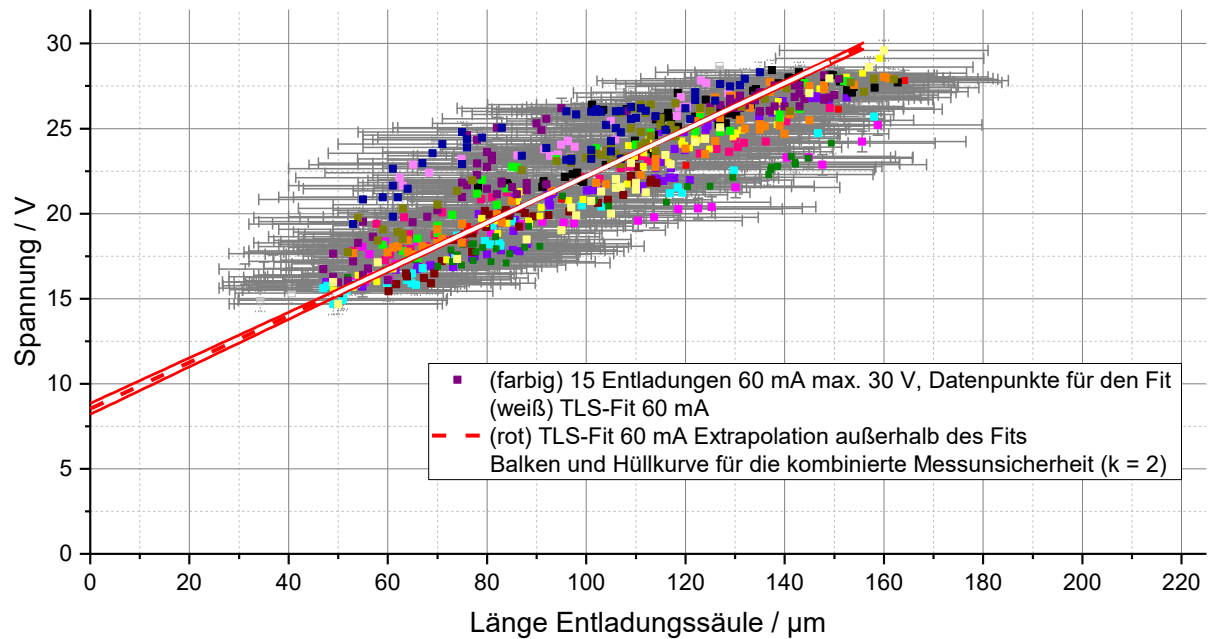
Abbildung 7.4 zeigt unten links die Anode, unten rechts die Kathode mit der Rille sowie dazwischen bzw. davor die Entladung (Wolke). In diesem Teil sind ebenfalls die Linien für die Längen und den Elektrodenabstand eingezeichnet. Im oberen Bildteil sind die Anodenfall-, Kathodenfall- und die Entladungssäulenspannung zugeordnet, aus der die Entladungssäulenlänge resultiert.

Die gemessene Entladungslänge basiert auf der beschriebenen geraden Verbindungslinie der sichtbaren Entladung. In Abbildung 7.4 unten ist zu erkennen, dass die tatsächliche Verbindungslinie der Entladung gebogen und somit länger sowie der Elektrodenabstand kürzer sein kann. Für die Ermittlung der tatsächlichen Entladungslänge ist neben der sogenannten Säule noch die Länge der Fallgebiete erforderlich, die hier nicht ermittelt werden konnte. Dies wird auch durch die geringe Größe der Entladung und die dazu relativ große Messunsicherheit erschwert.

Wie auch schon in Abbildung 7.1 zu erkennen ist, korrelieren die Messwerte der Spannung und die Entladungslänge. Dieser Zusammenhang wird gewöhnlich mit der in Abschnitt 3.3 beschriebenen von Ayrton veröffentlichten und von Nottingham verbesserten semi-empirischen Gleichung (4) für Lichtbogenkennlinien beschrieben [AYR02], [NOT23]. Die Messdaten werden über einen **Total Least Square Fit (TLS)** über die Methode der kleinsten Quadrate angenähert. Im Bereich unter 50  $\mu\text{m}$  Entladungslänge ergibt sich aufgrund wechselnder Positionen der Entladungen eine schlechte Korrelation. Im Bereich von ca. 50

$\mu\text{m}$  bis  $150\ \mu\text{m}$  besteht eine gute Korrelation zwischen der Spannung und der Entladungslänge. Dagegen verschlechtert sich die Korrelation im Bereich über  $150\ \mu\text{m}$ , da sich die Öffnungsgeschwindigkeit hier nahezu auf  $0\ \text{m s}^{-1}$  reduziert und somit veränderte Bedingungen herrschen.

Die folgende Abbildung 7.5 zeigt die Messpunkte und den Fit für  $60\ \text{mA}$ .



**Abbildung 7.5:** Messwerte der Spannungen für  $60\ \text{mA}$  einschließlich TLS-Fits, vgl. [UHF18].

Die Abbildung 7.5 zeigt die mehr als 600 Messpunkte von 15 Entladungen mit  $60\ \text{mA}$ , den TLS-Fit im Bereich von ca.  $50\ \mu\text{m}$  bis  $150\ \mu\text{m}$  und die Approximation für die umgebenden Bereiche. In diesen Auswertungen wird die Entladungssäulenlänge angegeben, da dieser längenabhängige Anteil der Entladungslänge über den Total Least Square Fit bestimmt wird. Die Kathodenfallspannung von Grakov [GRA67] mit  $8,6\ \text{V}$  stimmt gut mit der Spannung am Anfang des Spannungsverlaufes überein (vgl. Abbildung 7.1) und wird daher als Bezug für den Spannungswert bei der Länge  $0\ \mu\text{m}$  genutzt. Die Anodenfallspannung für Entladungslängen kleiner als  $200\ \mu\text{m}$  wird in einem ähnlichen Versuchsaufbau bei Capps [CAP72] mit kleiner als  $1\ \text{V}$  ermittelt. Diese wird in diesen Auswertungen vernachlässigt und muss in weiterführenden Arbeiten ermittelt werden. Mit Gleichung 3 ergibt sich der folgende Zusammenhang.

$$U_E(60\ \text{mA}) = 8,6\ \text{V} + 0,134 \frac{\text{V}}{\mu\text{m}} \cdot l_E \quad (9)$$

Für diese ersten Messungen wurde die in Abbildung 7.5 dargestellte kombinierte Messunsicherheit für  $k=2$  über die Anteile des TLS-Fits  $u_{\text{Fit}}$  (Hüllkurve) sowie die vereinfachten Annahmen der Tabelle 3 entsprechend angeführten relevanten Beiträge abgeschätzt.

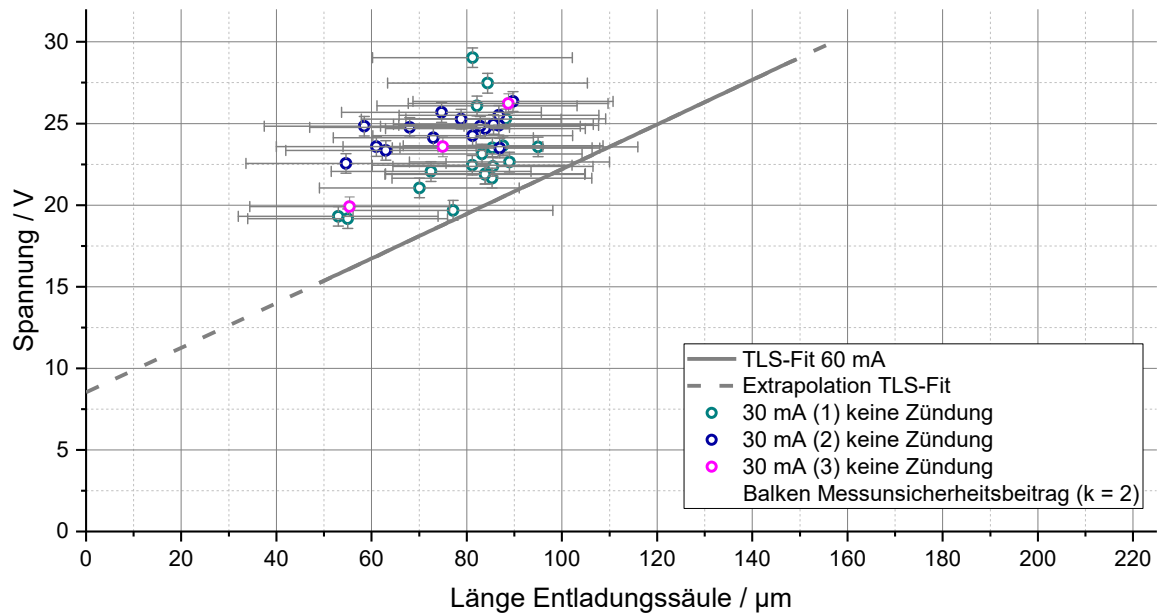


Die Länge wurde über die Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera mit dem optischen System ermittelt. Für den Unsicherheitsbeitrag der Länge werden die schon in Kapitel 5.3 genannten Beiträge für die optische Auflösung des Systems  $\delta l_{\text{Auflösung}} = \pm 12,5 \mu\text{m}$  (Rechteckverteilung), die Messung einer 2-D-Länge für eine dreidimensionale Entladung  $\delta l_{\text{3DAbweichung}} = \pm 15 \mu\text{m}$  ( $k = 2$ ) sowie durch die Zuordnung der Messwerte des Oszilloskops mit einer höheren Abtastrate Integrationszeit  $\delta l_{\text{Abtastung}} = \pm 4 \mu\text{m}$  ( $k = 2$ ) berücksichtigt. Für die Spannungsmessung sind die Beiträge aus dem Kalibrierschein relevant und berücksichtigt. Der Beitrag der Wiederholbarkeit wird durch die Werte der Hüllkurve des TLS-Fits abgeschätzt (vgl. Tabelle 3).

**Tabelle 3:** Abschätzung der Unsicherheitsbeiträge der Spannungs-Entladungssäulen-Kennlinie

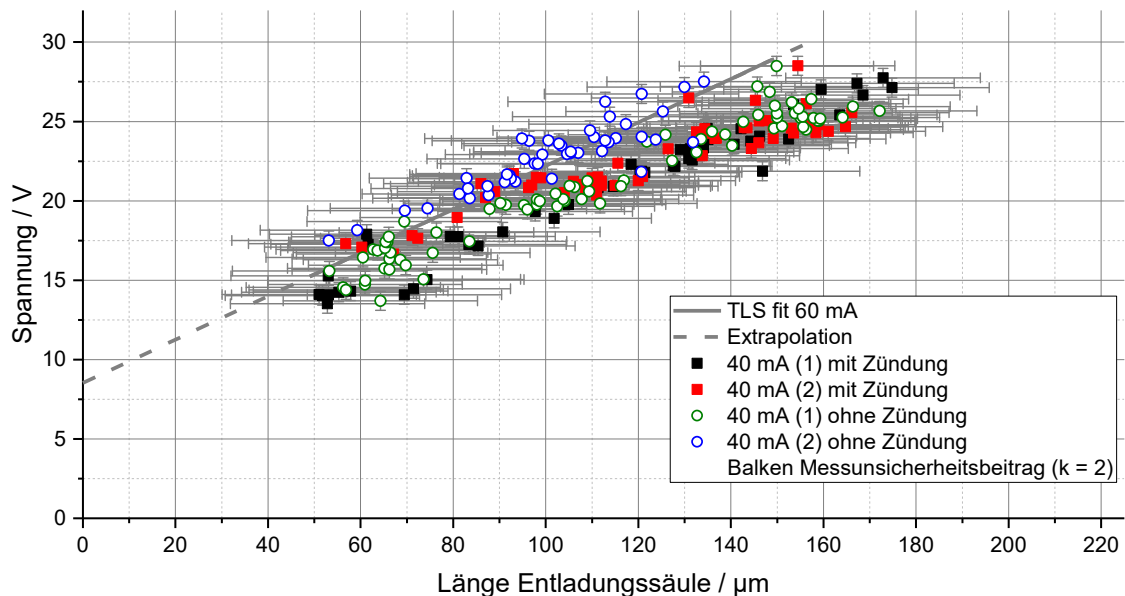
Größe	Schätzwert	$u$	Verteilung	$\partial y / \partial x_i$	Beitrag
$\delta l_{\text{Auflösung}}$	0,00 $\mu\text{m}$	7,22 $\mu\text{m}$	Rechteck	1	7,2 $\mu\text{m}$
$\delta l_{\text{3DAbweichung}}$	0,00 $\mu\text{m}$	7,5 $\mu\text{m}$	Normal	1	7,5 $\mu\text{m}$
$\delta l_{\text{Abtastung}}$	0,00 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	Normal	1	2 $\mu\text{m}$
$u_l$		10,6 $\mu\text{m}$			
$u_{l,k=2}$		21 $\mu\text{m}$			
$\delta U_{\text{Tastkopf}}$	0,00 V	0,6 V	Normal	1	0,6 V
$u_{UE}$	0,00 V	0,6 V			
$u_{UE,k=2}$	0,00 V	1,2 V			

Die Auswertung der TLS-Fits für die Stromwerte 40 mA und 100 mA ergeben eine vergleichbare Steigung wie für den vorgenannten TLS-Fit für 60 mA. Der Fit bzw. die Werte für Entladungen mit 30 mA weichen jedoch ab (vgl. Abbildung 7.6).



**Abbildung 7.6:** Messwerte für Entladungen mit 30 mA im Vergleich zum TLS-Fit für 60 mA, vgl. [UHF18]

Die Messwerte für Entladungen mit 30 mA zeigen tendenziell einen steileren Verlauf und kürzere Entladungen, was auf die instabilen Existenzbedingungen im Grenzbereich zurückzuführen ist. Die Entladungen mit 30 mA können mit den Versuchsbedingungen dieser Arbeit das Luft-Gas-Gemisch nicht zünden. Entladungen mit 40 mA im Übergangsbereich können teilweise zünden. Messwerte für Entladungen mit 40 mA mit und ohne Zündung im Vergleich zum TLS-Fit mit 60 mA sind in der folgenden Abbildung 7.7 dargestellt.

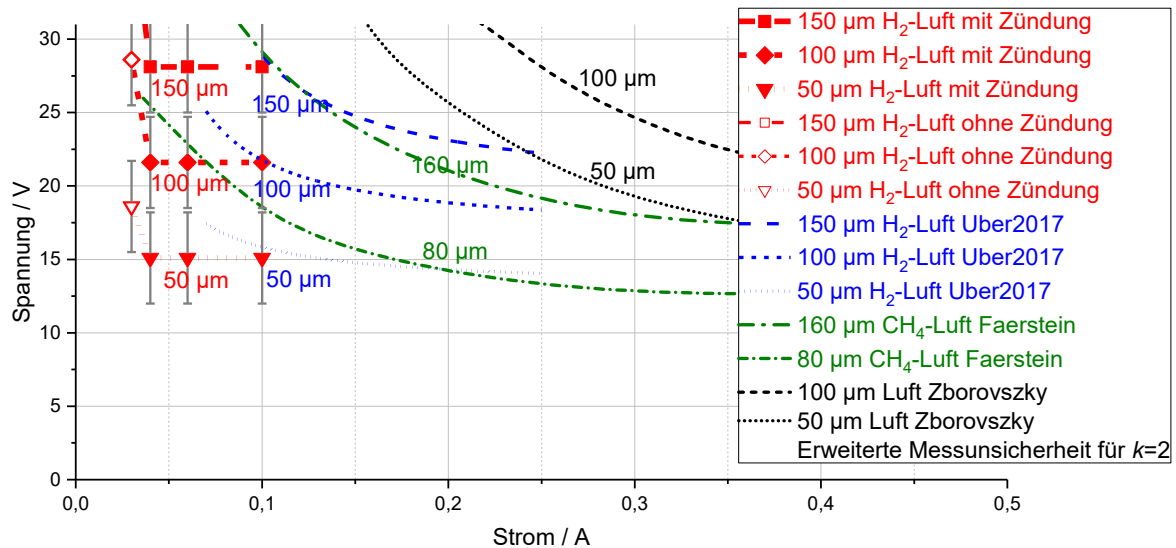


**Abbildung 7.7:** Messwerte für Entladungen mit 40 mA im Vergleich zum TLS-Fit mit 60 mA, vgl. [UHF18]

Die Entladungen mit 40 mA zeigen einen vergleichbaren Verlauf wie Entladungen mit 60 mA, wie es mit dem TLS-Fit für 60 mA in Abbildung 7.7 mit den Messwerten dargestellt ist. Die

Entladungen mit und auch ohne Zündungen erreichen Längen über 150  $\mu\text{m}$ . Als Ursachen für eine erfolgreiche Zündung in diesem Grenzbereich werden weitere Einflüsse auf den Vorgang wie Strömungen etc. vermutet.

Aus den vorgenannten TLS-Fits ergeben sich somit folgende quasistatische Strom-Spannungs-Kennlinien (vgl. Abbildung 7.8).



**Abbildung 7.8:** U-I-Kennlinie für die hier ermittelten Entladungen im Vergleich den berechneten Kennlinien von Zborovszky und Contugo [ZC74] und Faerstein [FAE86]

Die Lichtbogenkennlinien der Entladungen in Wasserstoff-Luft-Gemisch in Abbildung 7.8 zeigen die hier neu ermittelten Spannungswerte für definierte Stromwerte (const.) 30 mA, 40 mA, 60 mA und 100 mA. Die Kennlinien wurden für Kontaktöffnungsabstände von 50  $\mu\text{m}$  (Dreiecke, rot), 100  $\mu\text{m}$  (Rauten, rot) und 150  $\mu\text{m}$  (Quadrate, rot) aufgenommen. Bei Entladungen mit 30 mA erfolgten keine Zündungen (offene Symbole, rot). Entladungen mit Zündungen (geschlossene Symbole, rot) konnten im Bereich von 40 mA bis 100 mA ermittelt werden. Diese Werte sind die für die Worst-Case-Bedingungen dieser Arbeit gültig. Erstmals können so für Entladungen im Wasserstoff-Luft-Gemisch Werte im Bereich kleiner als 100 mA dargestellt werden. Für einen Vergleich sind ebenfalls die berechneten Kennlinien für Methan von Zborovszky [ZC74] (schwarz) basierend den auf theoretischen Werten von Holm [HOL67] sowie von Faerstein [FAE86] (grün) dargestellt. Die ermittelten Kennlinien passen gut zu den Kennlinien der vergleichbaren Messungen aus der genannten Literatur.

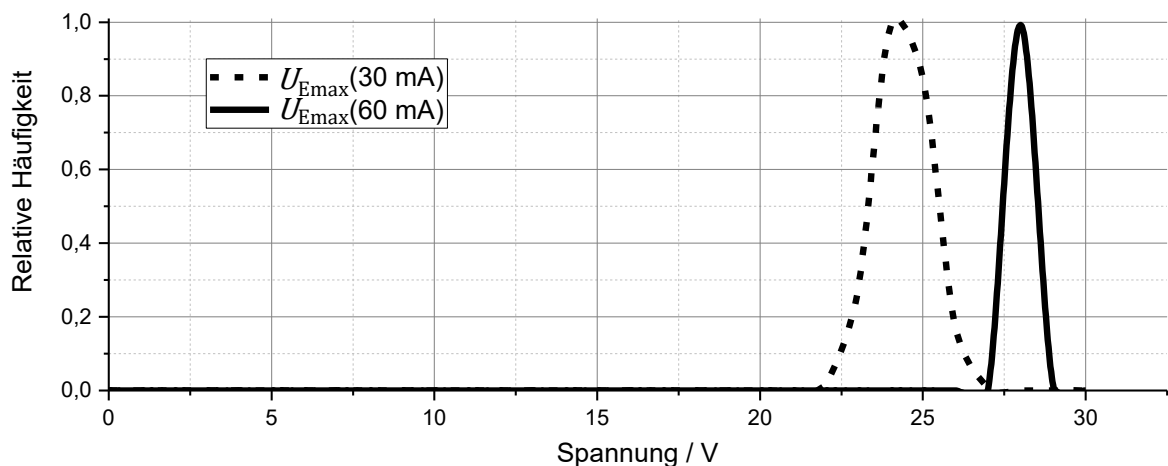
Ebenfalls ist in Abbildung 7.8 eine Abschätzung der kombinierten Messunsicherheit (graue Balken) angegeben. Für die Spannung werden die Beiträge der Länge  $\delta U_{\text{Länge}} = 10,6 \mu\text{m}$  (vgl. Tabelle 3,  $u_1$ ) des Tastkopfes  $\delta U_{\text{Tastkopf}} = 0,6 \text{ V}$  (vgl. Tabelle 3,  $u_{\text{UE}}$ ), sowie des Fits von  $\delta U_{\text{Fit}} = 0,2 \text{ V}$  berücksichtigt. Für den Strom wird der Beitrag für die Stromzange mit  $\delta I_{\text{Stromzange}} = 0,6 \text{ mA}$  mit den Angaben aus dem Kalibrierschein angesetzt (vgl. Tabelle 4).

**Tabelle 4:** Abschätzung der Unsicherheitsbeiträge der UI-Kennlinie

Größe	Schätzwert	$u$	Verteilung	$\partial y/\partial x_i$	Beitrag
$\delta U_{\text{Länge}} (u)$	0,00 $\mu\text{m}$	10,6 $\mu\text{m}$	Normal	0,135 V $\mu\text{m}^{-1}$	1,4 V
$\delta U_{\text{Tastkopf}}$	0,00 $\mu\text{m}$	0,6 V	Normal	1	0,6 V
$\delta U_{\text{Fit}}$	0,00 $\mu\text{m}$	0,2 V	Normal	1	0,2 V
$u_{\text{UKL}}$		1,56 V			
$u_{\text{UKL\_k=2}}$		3,1 V			
$\delta I_{\text{Stromzange}}$	0,00 mA	0,6 mA	Normal	1	0,6 mA
$u_{\text{IKL}}$		0,6 mA			
$u_{\text{IKL\_k=2}}$		1,2 mA			

Die ermittelten Kennlinien gelten im Rahmen der hier vorliegenden Bedingungen und können als Grundlage für die Simulation genutzt werden. Die Kennlinien sind quasistatische Kennlinien. Dynamische Situationen von beispielsweise sich ändernden Stromwerten sind somit nicht berücksichtigt und werden in Kapitel 9 im Ausblick angesprochen.

Korrespondierend zu den Fits sind in der Abbildung 7.9 die maximalen Spannungswerte der Entladungen aufgeführt.

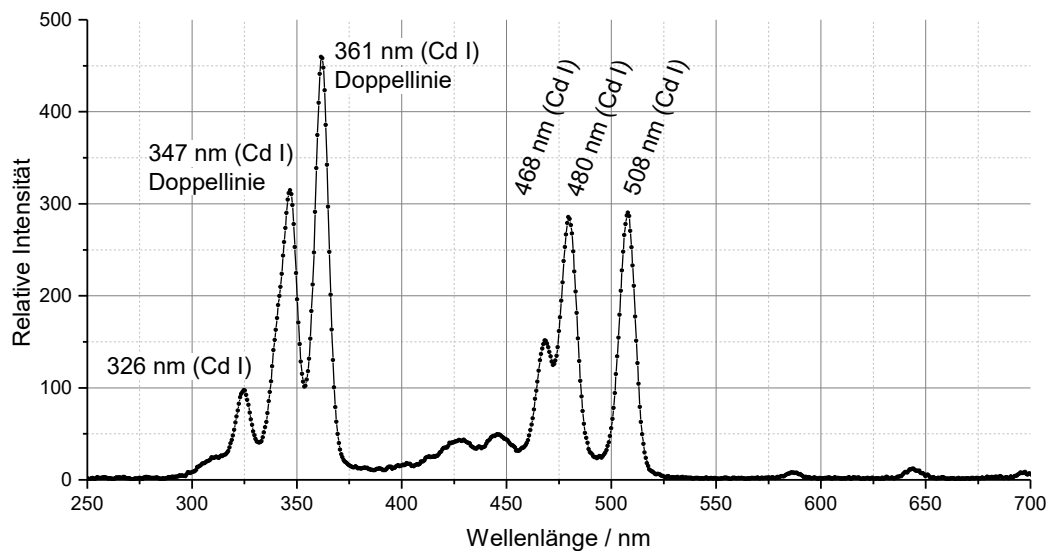
**Abbildung 7.9:** Häufigkeit der maximalen Spannungswerte in Abhängigkeit des Stromwertes

Die maximalen Spannungswerte der Entladungen erreichen bei den stabileren Entladungen (d. h. mit höheren Stromwerten wie beispielsweise 60 mA)  $28,1 \text{ V} \pm 0,6 \text{ V}$  ( $k=2$ ) und die instabileren Entladungen (wie beispielsweise bei 30 mA) erreichen  $24,4 \text{ V} \pm 1,7 \text{ V}$  ( $k=2$ ).

## 7.2 Spektroskopische Untersuchungen<sup>24</sup>

Mit den spektroskopischen Untersuchungen können die Art und die Konzentration der strahlenden Elemente ermittelt werden, um mehr über die Eigenschaften des strahlenden Plasmas herauszufinden. Für die rückwirkungsfreie Ermittlung des Spektrums oder zur Charakterisierung von Lichtbögen ist die optische Emissionsspektroskopie (OES) ein gängiges Verfahren [HEG07], [GSU13], [FAN06], [FAN06], [FAN06].

Die gemessenen Spektren werden über den in Abschnitt 5.1 dargestellten Versuchsaufbau mit dem Spektrografen ermittelt. Die folgende Abbildung 7.10 zeigt das Spektrum für eine typische Entladung nach ca. 1 000  $\mu\text{s}$ .



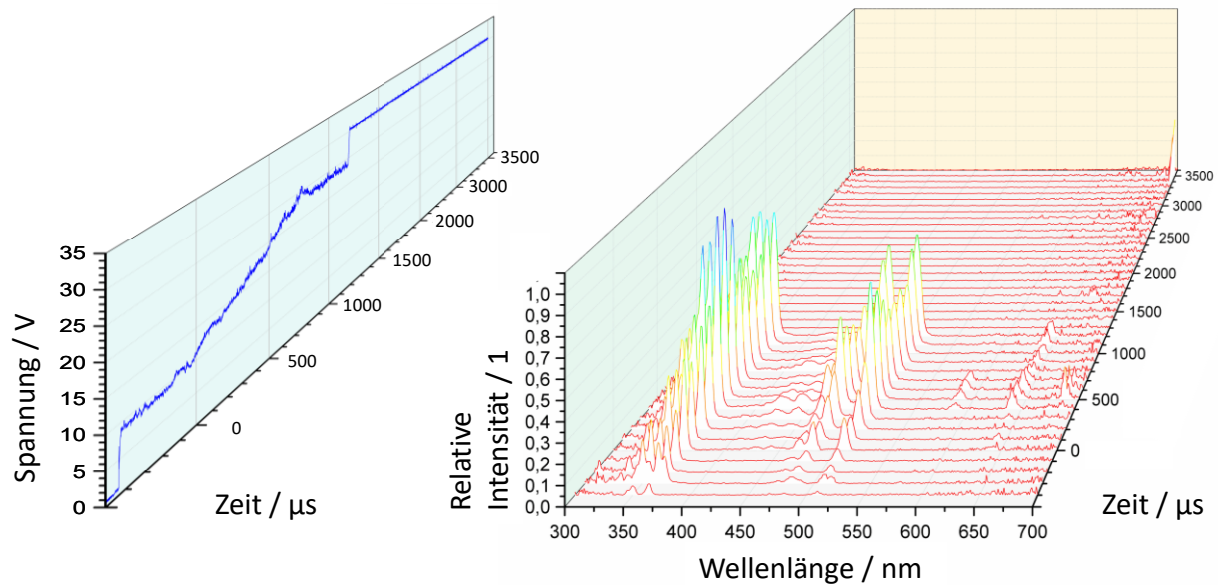
**Abbildung 7.10:** Gemessenes Spektrum einer typischen Entladung mit 60 mA nach ca. 1 000  $\mu\text{s}$ , vgl. [URB18]

Das gemessene Spektrum der Entladung wird von den typischen Emissionslinien des Cadmiums (326 nm, 347 nm Doppellinie, 361 nm Doppellinie, 468 nm und 508 nm) dominiert. Zusätzlich sind einige weitere schwache Linien bei 589 nm und 698 nm sowie ein nicht eindeutig zuordenbares Band zwischen 400 nm und 460 nm erkennbar. Eine Erklärung dieses Bandes wäre, dass es von einem der Elemente erzeugt werden könnte, die sich in der Nähe der Entladung befinden: Natrium, Wolfram, Kohlenstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Aluminium, Eisen, Sauerstoff und Chlor. Das Band wird im Wesentlichen Wolfram zugeordnet, kann damit aber nicht ausreichend erklärt werden. Der Peak 589 nm wird Natrium zugeordnet, da selbst kleinste Mengen an Natrium ausreichen, um diese Linie zu erzeugen. Eine Quelle könnte das in den Fingerabdrücken enthaltene Salz sein. So kann das Spektrum der Entladung eindeutig dem Cadmium-Metaldampf zugeordnet werden, welcher ursprünglich von der Kathode und der Anode stammt.<sup>25</sup>

<sup>24</sup> Teile dieses Abschnitts sind in Uber et al. [URB18] erschienen.

<sup>25</sup> Die spektrale Analyse (Fits) der relevanten Elemente erfolgte durch Jens Brunzendorf, PTB.

Der Verlauf des Spektrums über den gesamten Zeitraum der Entladung ist in der folgenden Abbildung 7.11 dargestellt.



**Abbildung 7.11:** Spannungs- und Intensitätsverlauf einer Entladung mit anschließender Zündung bei max. 30 V und 60 mA (rechteckige Kennlinie), vgl. [URB18]

Im typischen Intensitätsverlauf in Abbildung 7.11 ist zu erkennen, dass sich die Intensität während der Entladung proportional zur Spannung verhält. Ebenfalls zeigt der Verlauf, dass Linien des Metaldampfes bis zum Ende der Entladung dominant sind. Das nicht eindeutig zuzuordnende Band zwischen 400 nm und 460 nm hat sein Maximum beim maximalen Spannungswert während des Entladungsprozesses.

Damit kann diese Entladung einer Metaldampfentladung zugeordnet werden, die in der Literatur in Verbindung mit Vakuumentladungen beschrieben wird [LAT95], [BSM95]. Jedoch fokussiert sich die Literatur auf Anwendungen im Kilowattbereich. Ebenfalls kann resümiert werden, dass sich während der Entladung die relative Strahlungsintensität proportional zur Spannung, die bei einem konstanten Stromwert der Leistung entspricht, verhält.

Ein Übergang in den Gasbogen kann nicht beobachtet werden. Dieser kann bei Abständen von 10 bis 1000 µm entstehen [BU70].

### 7.3 Temperaturabschätzung<sup>26</sup>

In vorhergehenden Untersuchungen vor den Temperaturabschätzungen in dieser Arbeit erfolgten mehrere Ansätze zur Ermittlung der Temperatur. Beispielsweise wurde die Temperatur der Vorprozesse und Hauptentladungen mit einer Thermografiekamera untersucht, wobei die gemessenen Temperaturen von mehreren 100 °C hinsichtlich der zeitlichen Auflösung, des unbekannten Emissionsfaktors (1 eingestellt) und Beobachtungswinkel nur eine grobe Abschätzung sind.

Die Anregungstemperatur des Plasmas kann mittels Boltzmann-Plot aus dem aufgenommenen Strahlungsspektrum der Entladung (vgl. Kapitel 7.2) ermittelt werden. Aufgrund fehlender Stickstoff- und Wasserstofflinien ist eine Temperaturbestimmung über die Linienverbreiterung nicht möglich [USE17]. Daneben erfolgt über den Zusammenhang zwischen der Temperatur und der elektrischen Leitfähigkeit [RKK17], [DE90] die Abschätzung einer mittleren Temperatur des Plasmas. Für beide Temperaturbestimmungsmethoden wird ein Plasma im Gleichgewichtszustand angenommen.

Bei einem Plasma im Gleichgewicht entsprechen die Intensitäten der Emissionen von Spektrallinien unterschiedlicher Energieniveaus der Boltzmann-Verteilung. Über mindestens zwei Spektrallinien unterschiedlicher Energieniveaus kann anhand der Steigung die Anregungstemperatur ermittelt werden, die auf folgendem Zusammenhang basiert (vgl. Gleichungen (10) und (11)) [WIE91], [PDK86], [GRI97], [BRO02].

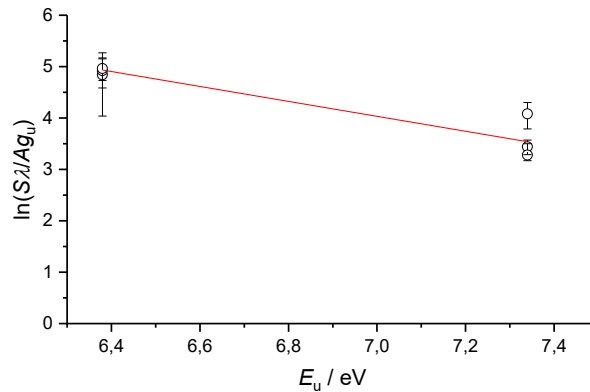
$$\ln\left(\frac{S \cdot \lambda}{A \cdot g_u}\right) = -\frac{E_u}{k_B \cdot T_{\text{Anregung}}} + \text{Konstante} \quad (10)$$

$$\ln\left(\frac{S \cdot \lambda}{A \cdot g_u}\right) = m \cdot E_u + \text{Konstante} \quad (11)$$

Damit kann die Steigung  $m$  über die Intensität  $S$  von verschiedenen Linien, die Wellenlänge  $\lambda$ , die Übergangswahrscheinlichkeit für die Emission (Einstein-Koeffizient)  $A$ , das statistische Gewicht  $g_u$  und die Anregungsenergie des unteren Energieniveaus  $E_u$  ermittelt werden (vgl. Abbildung 7.12)

---

<sup>26</sup> Teile dieses Abschnitts sind in Über et. al. [URB18] erschienen.



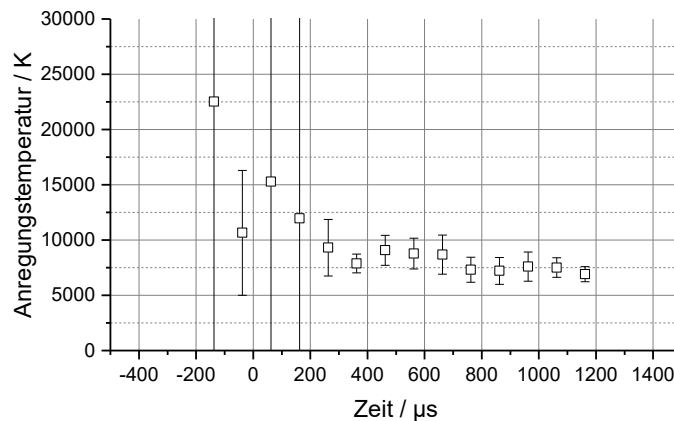
**Abbildung 7.12:** Beispiel für die Bestimmung der Temperatur über Steigung des Boltzmann-Plots, vgl. [URB18]

Die Temperatur kann dann über die Steigung  $m$  und die Boltzmann-Konstante  $k_B$  berechnet werden [WIE91], [GRI97], [BRO02].

$$T_{\text{Anregung}} = \frac{-1}{k_B \cdot m} \quad (12)$$

In den Auswertungen werden für die Cadmium-Linien die erforderlichen Daten aus der NIST ASD genutzt [KRA18]. Der Fehler für diese Methode der Temperaturbestimmung ist laut Griem [GRI97] selten unter  $\pm 10\%$ .

Damit ergibt sich der folgende typische Verlauf der Anregungstemperatur, die hier der Elektronentemperatur entspricht (vgl. Abbildung 7.13).



**Abbildung 7.13:** Beispiel für den Verlauf der Anregungstemperatur einer Entladung mit anschließender Zündung bei max. 30 V und 60 mA, vgl. [URB18]

Im Beispiel für den Verlauf der Anregungstemperatur sind während der Vorprozesse von  $-500\ \mu\text{s}$  bis  $0\ \mu\text{s}$ , in denen sich der Draht in einem Abstand von  $< 50\ \mu\text{m}$  und die Spannung in einem Bereich von 8 V bis 10 V befindet, Anregungstemperaturen von mehr als 10 000 K ermittelt. Nach einer Übergangszeit ab ca.  $700\ \mu\text{s}$  nähert sich die Anregungstemperatur einem Wert, der bezogen auf die relativ große Messunsicherheit zwischen 5 000 K und 7 500 K liegt. In diesem Zeitraum liegt die Spannung oberhalb von 20 V und somit wesentlich über der



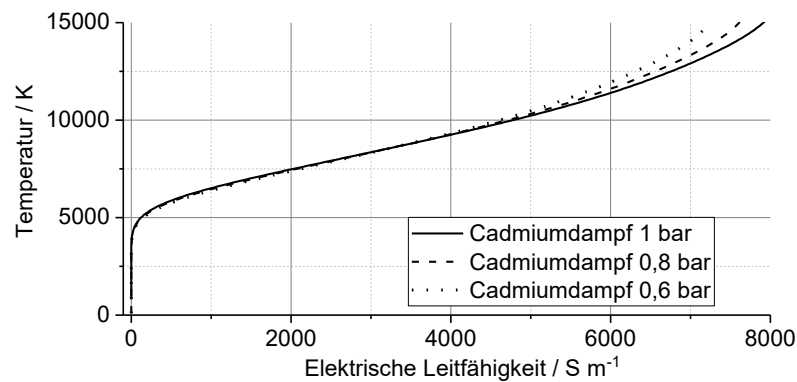
Fallspannung. Die Messwerte im Verlauf weisen eine hohe Messunsicherheit auf, sind somit ein Trend in diesem Temperaturbereich und dienen der Übersicht.

Für eine Ermittlung der Plasmatemperatur über den Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit des Cadmiumdampfes und der Plasmatemperatur wird ebenfalls Plasma im Gleichgewicht vorausgesetzt. Auf dieser Basis kann über die experimentell bestimmte Geometrie der Entladung, die elektrischen Werte und den Druck die elektrische Leitfähigkeit berechnet und die Temperatur abgeschätzt werden.

Für die Geometrie der Entladung werden folgende vereinfachenden Annahmen getroffen. In der Praxis wird dieses Modell oft für eine Näherung genutzt [LIN87]:

- Die Entladung ist ein rotationssymmetrischer Zylinder.
- Der Temperatur- bzw. Leitfähigkeitsverlauf im Zylinder ist gleichmäßig, d. h., es liegt eine mittlere Temperatur vor.
- Die Wärme wird nur über die nicht wärmeleitende Umgebung abgeführt, d. h., die Wärmeleitung wird nicht realistisch berücksichtigt.

Ebenfalls wird bei dieser Abschätzung angenommen, dass die Entladung nur aus Cadmium-Dampf besteht. Dafür werden die in der Abbildung 7.14 dargestellten Daten genutzt, die von Gortschakow [GOR17] zur Verfügung gestellt wurden.

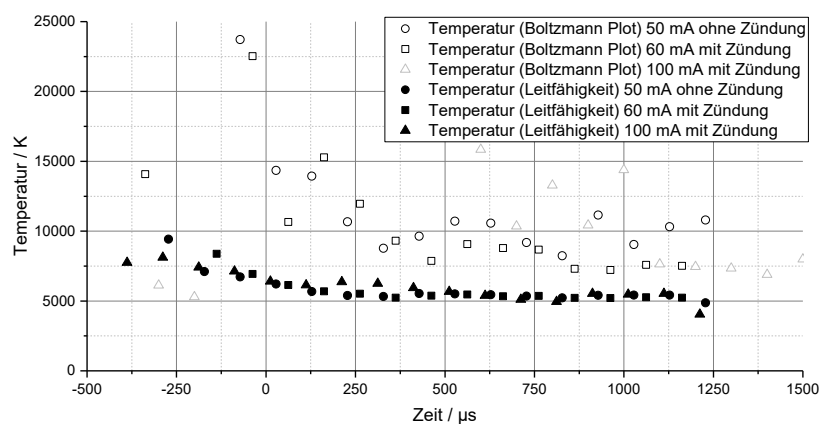


**Abbildung 7.14:** Temperatur in Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit für Cadmium-Dampf bei verschiedenen Drücken, vgl. [GOR17]

In Abbildung 7.14 ist der Zusammenhang der Temperatur und der elektrischen Leitfähigkeit für verschiedene Drücke dargestellt. Für die Berechnung werden die Daten mit 1 bar genutzt, da sich die Kennlinien besonders im relevanten Bereich nur unwesentlich unterscheiden. Die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma_E$  der Entladung wird entsprechend Gleichung (13) über den Stromwert  $I_E$ , die Länge  $l$  und die Querschnittsfläche  $A$  sowie die Gesamtspannung  $U_E$  und die Fallspannung  $U_F$  der Entladung berechnet [RKK17], [CRW91], [DE90].

$$\sigma_E(t) = \frac{I_E(t) \cdot l(t)}{(U_E(t) - U_F) \cdot A_Q(t)} \quad (13)$$

Für die Auswertung wird aus den spektralen Aufnahmen (vgl. Kapitel 7.2) die Abbildung der Entladungen bei 508 nm genutzt, da diese in der Bildmitte aufgenommen werden und in der Bildmitte die geringsten optischen Verzerrungen erwartet werden. Die Bestimmung der Länge und der Querschnittsfläche erfolgte nach der in Kapitel 7.1 beschriebenen Methode für die Längenermittlung. Die Querschnittsfläche wird aus dem Mittelwert von drei Profillinien gebildet (vgl. Abbildung 7.2). Damit ergibt sich für dieses an einen Zylinder angenäherte wirksame Volumen der Entladung eine elektrische Leitfähigkeit  $\sigma_E$ , mit der über den Zusammenhang in Abbildung 7.14 eine mittlere Temperatur  $T$  ermittelt werden kann. Der zeitliche Verlauf dieser Temperatur für verschiedene Ströme ist in der folgenden Abbildung dargestellt (vgl. Abbildung 7.15).



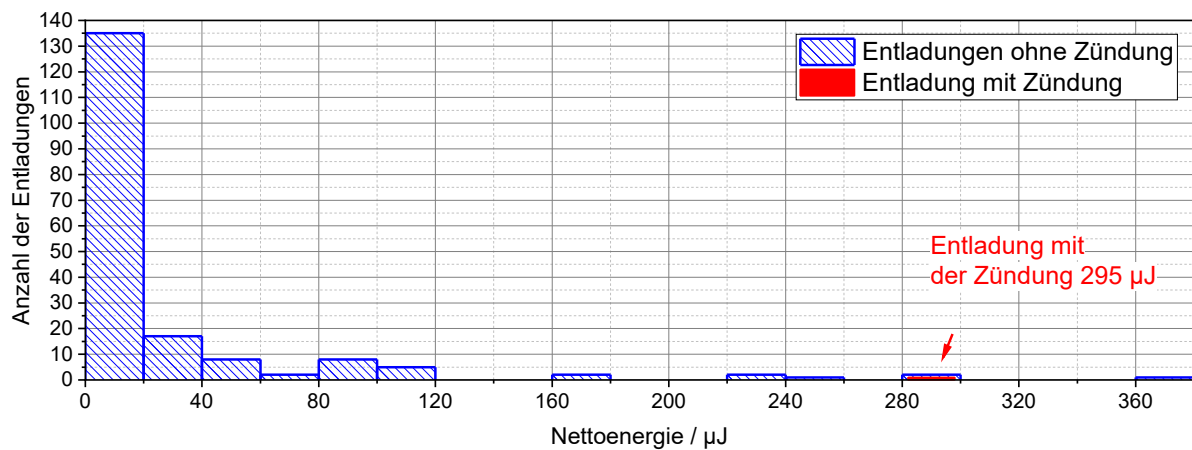
**Abbildung 7.15:** Temperaturverlauf, ermittelt über die Leitfähigkeit und zum Vergleich über den Boltzmann Plot, 60 und 100 mA – mit Zündung, 50 mA ohne Zündung, vgl. [URB18]

Wie in Abbildung 7.15 dargestellt, zeigen die Temperaturverläufe der Entladungen mit unterschiedlichen Stromwerten vor dem Hintergrund der Messunsicherheit (Abbildung 7.13) nur unwesentliche Unterschiede. Auch der Temperaturverlauf für den Stromwert 50 mA, bei dem keine Zündung erfolgt, weist nur unwesentliche Unterschiede auf. Die Temperaturdifferenz zwischen den aus dem Boltzmann-Plot und der Leitfähigkeit ermittelten Temperaturen am Anfang der Entladung weist auf eine Abweichung vom Gleichgewichtsplasma hin [BRO02], [FK11]. Im weiteren Verlauf streben alle Temperaturverläufe der Entladungen einen ähnlichen Wert im Bereich zwischen 5 000 K und 10 000 K an. Ein prinzipieller Unterschied zwischen Entladungen mit Zündung (60 mA, 100 mA) und ohne Zündung (50 mA) sowie eine Abhängigkeit beispielsweise von der Leistung, die bei 100 mA doppelt so hoch ist, sind nicht zu erkennen.

Daher wird angenommen, dass die Temperatur des Plasmas eine Voraussetzung für ein ausreichendes Temperaturfeld innerhalb des maßgeblichen Zündvolumens (200 bis 300  $\mu\text{m}$ ) ist (vgl. Kapitel 3.4), aber beispielsweise die Dauer und die Geometrie der Entladung oder weitere Einflüsse wie die Bildung freier Radikale den Prozessverlauf in Richtung Zündung entscheidend beeinflussen können [LAN13].

## 7.4 Zündkriterien

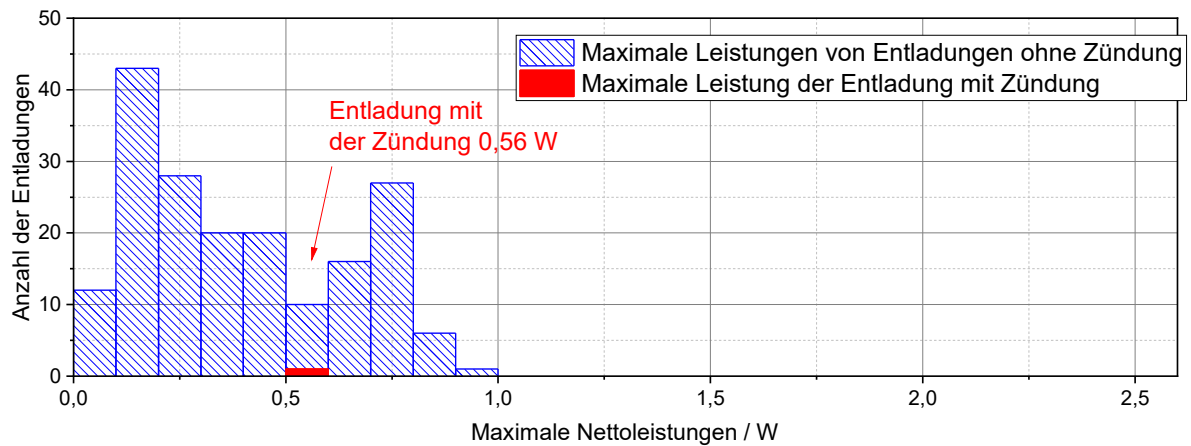
Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, entsteht durch den Eintrag der Energie in das Plasma ein Temperaturfeld, das aus der zugeführten elektrischen Energie und dem abgeleiteten Wärmestrom wie Elektrodenverluste, Wärmeableitung in Gas, Strahlung etc. entsteht. Für eine Zündung, d. h. eine selbständig fortschreitende thermochemische Reaktion, sind zusätzlich zeitliche und räumliche Bedingungen erforderlich [USE17]. Beim Prüfvorgang mit dem IEC-Funkenprüfgerät treten stromkreisspezifische Entladungen mit unterschiedlichen Nettoenergiewerten auf, die nicht zwingend zu einer Zündung führen. Die diesbezügliche Streuung ist beispielhaft in Abbildung 7.16 zu erkennen. Eine Entladung, die hierbei zur Zündung führt (rot), kann eine geringere Nettoenergie als die Entladung mit der maximalen Nettoenergie besitzen.



**Abbildung 7.16:** Histogramm der Entladungsenergien im IEC-Funkenprüfgerät bei einem Prüfvorgang (max. 30 V, 40 mA)

Die Abbildung 7.16 zeigt ein Histogramm für ein stromkreisspezifisches Beispiel, in dem die **Verteilung der Energien** von Entladungen dargestellt ist, die bei einem Prüfvorgang im IEC-Funkenprüfgerät bei einem Stromwert von 40 mA und einer maximalen Spannung von 30 V auftreten. Die Entladung, die hier zur Zündung führt, hat eine Nettoenergie von 295  $\mu\text{J}$  und dauerte 296  $\mu\text{s}$ . Diese Energie liegt deutlich über der in Kapitel 3.4 genannten Mindestzündenergie für das verwendete Wasserstoff-Luft-Gemisch von ca. 17  $\mu\text{J}$ . Somit muss bei einer Entladung mit Zündung (rot) ein hoher Energieanteil für die Kompensation der Verluste aufgewendet werden. Im Histogramm ist zu erkennen, dass bei diesem Vorgang auch weitere Entladungen mit vergleichbaren und höheren Energien auftreten, die nicht zur Zündung führen. Damit hat der Anteil für die Verluste eine hohe Streuung und ist als Zündkriterium nicht nutzbar.

Die **Verteilung** der maximalen **Nettoleistungen** der Entladungen bei einem Prüfvorgang im IEC-Funkenprüfgerät zeigt das Histogramm in Abbildung 7.17.



**Abbildung 7.17:** Histogramm der maximalen Entladungsleistungen im IEC-Funkenprüfgerät bei einem Prüfvorgang (max. 30 V, 40 mA)<sup>27</sup>

Das im Histogramm (vgl. Abbildung 7.17) dargestellte Beispiel zeigt, dass bei diesem Prüfvorgang Entladungen ohne Zündung (blau) bei einer höheren Nettoleistung als bei der Entladung mit Zündung (rot) auftreten. Ähnlich wie bei der vorgenannten Energiebetrachtung kann bei den Entladungen ohne Zündung dem Gasgemisch der für eine Zündung erforderliche Leistungsanteil nicht zugeführt werden, da die Verluste hierbei zu groß sind. Jedoch treten Situationen auf, bei denen aufgrund geringerer Verluste Zündungen möglich sind. Für diese Situationen lässt sich eine minimale Nettoleistung ermitteln.

Für die Ermittlung der Zündkriterien der Worst-Case-Entladung werden daher im Folgenden neben der Leistung auch die Zeitdauer des Energieeintrages sowie das wirksame Volumen (mithilfe der Länge) der Entladung betrachtet. Um die Zündgrenze der hier untersuchten Entladungen ermitteln zu können, werden Entladungen mit einer Konstantstromregelung erzeugt, deren Stromwerte variiert werden. Für das weitere Verständnis werden zusätzlich Entladungen mit definierter maximaler Nettoleistung und auch bei geringeren Maximalspannungen untersucht.

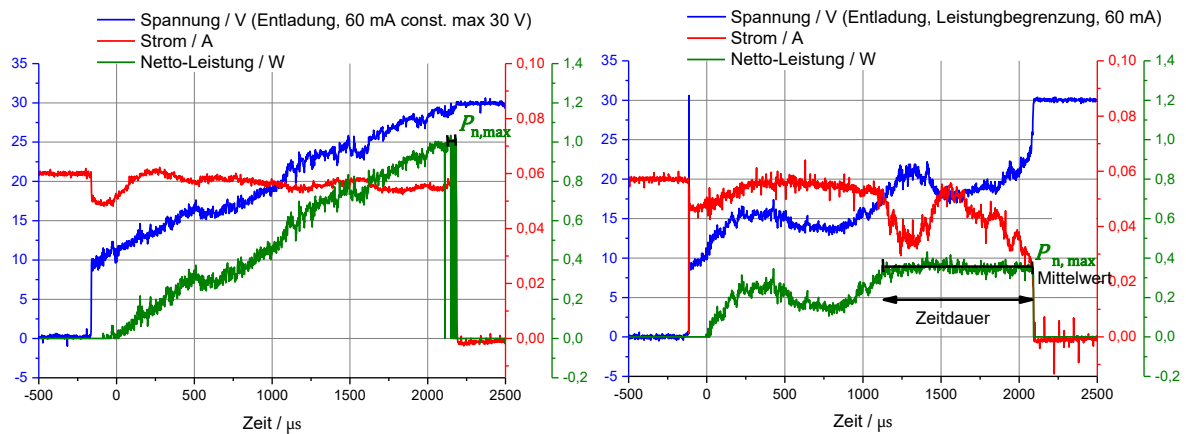
Die Nettoleistung kann über den Strom- und Spannungsverlauf der Entladungen und über Gleichung (15) wie folgt bestimmt werden.

$$P_n(t) = (U_E(t) - U_V) \cdot I_E(t) \quad (14)$$

Die Abbildung 7.18 links zeigt für Entladungen mit Konstantstromregelung beispielhaft den Verlauf von Spannung (blau), Strom (rot) und Nettoleistung (grün). Hierbei ist der kontinuierliche Anstieg der Spannung sowie der entsprechenden Nettoleistung bis zu einem Maximalwert zu erkennen. Ursache dafür ist die sich kontinuierlich vergrößernde Entladungslänge. Die Abbildung 7.18 rechts zeigt die typischen Verläufe für Entladungen mit zusätzlicher Begrenzung der elektrischen Leistung. Hierbei ist zu erkennen, dass die

<sup>27</sup> Die in den Histogrammen mit der Nettoenergie Abbildung 7.16 und der Nettoleistung Abbildung 7.17 abgebildeten Daten basieren auf unterschiedlichen Messreihen.

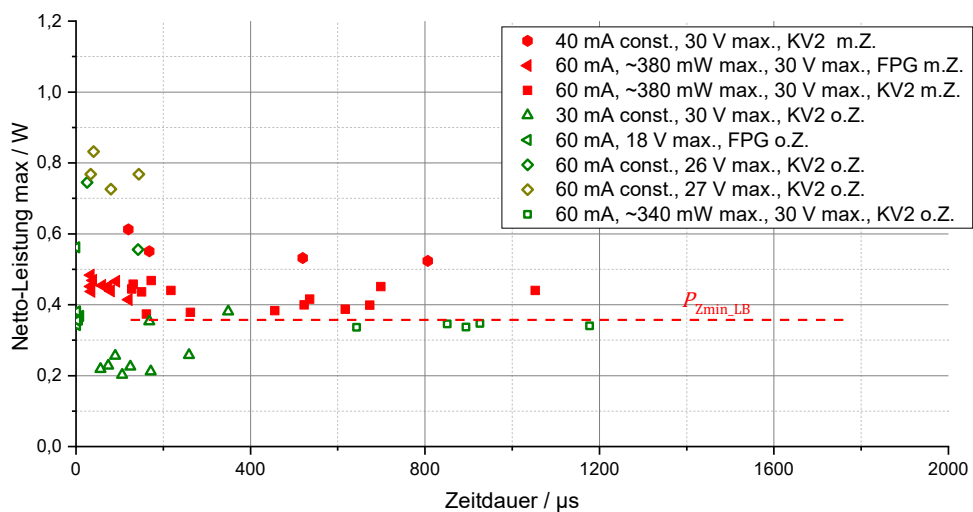
Nettoleistung am Ende der Entladung einen konstanten Wert hat, da über die Leistungsbegrenzung der Strom reduziert wird. Ursache dafür ist die mit der Entladungslänge ansteigende Spannung.



**Abbildung 7.18:** Beispiele für die Verläufe der Spannung (blau), den Strom (rot) und der Nettoleistung (grün) für Entladungen mit Konstantstromregelung (links) und mit Leistungsbegrenzung (rechts)

Die maximale Netto-Leistung kann aus dem Verlauf der Nettoleistung entnommen werden. Bei der mit der Konstantstromregelung erzeugten Entladung ist im Verlauf der Nettoleistung (Abbildung 7.18 links) ein kurzer Peak bei der maximalen Nettoleistung  $P_{n,max}$  zu erkennen. Im Unterschied dazu zeigt der Verlauf der Nettoleistung mit Leistungsbegrenzung (Abbildung 7.18 rechts), dass die maximale Nettoleistung  $P_{n,max}$  für eine längere Zeitdauer umgesetzt wird.

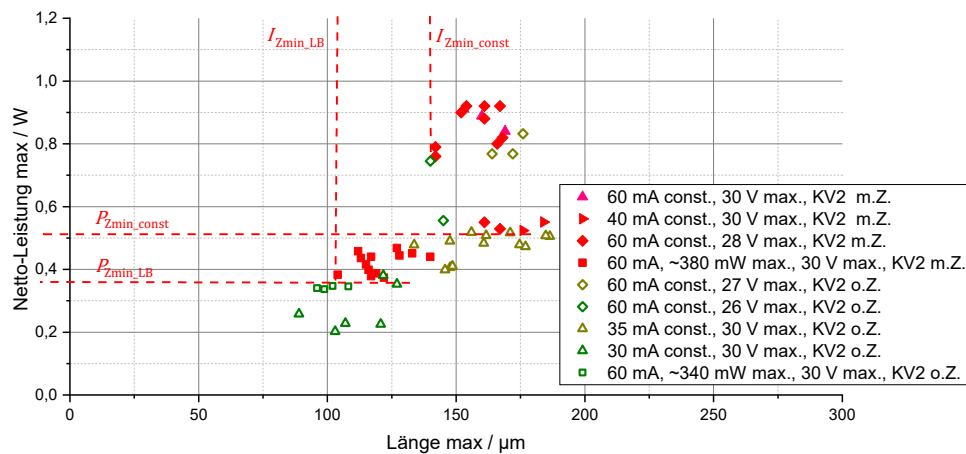
Die ermittelten maximalen Nettoleistungen in Abhängigkeit von der Zeitdauer sind für ausgewählte Entladungen mit Konstantstromregelung (const), mit zusätzlicher Leistungsbegrenzung (340 mW, 380 mW) und begrenzter Spannung (26 V, 27 V) in Abbildung 7.19 dargestellt.



**Abbildung 7.19:** Maximale Nettoleistungen in Abhängigkeit von der Dauer (Zündungen (rot) und ohne Zündung (grün))

Abbildung 7.19 zeigt, dass unterhalb einer Nettoleistung von 340 mW auch bei lang andauernden Entladungen keine Zündungen (vgl. Legende: o.Z., grün) nachweisbar waren. Ein Zusammenhang zwischen der Zündung (vgl. Legende: m.Z., rot) und der Dauer und maximalen Leistung, beispielsweise in Analogie zu einem Flächen-Zeit-Gesetz [KIN57], ist nicht zu erkennen. Kravchenkow [KEY75] ermittelte unter nicht direkt vergleichbaren Versuchsbedingungen eine kritische Zeitdauer von 10  $\mu\text{s}$ , unterhalb der keine Zündung erfolgte, sowie ein Minimum der Energie zum Zeitpunkt 110  $\mu\text{s}$ . Diese Kriterien konnten in der vorliegenden Arbeit nicht erkannt werden.

Um den Einfluss der Länge bzw. des Volumens auf den Zündvorgang zu ermitteln, sind in Abbildung 7.20 die maximalen Nettoleistungswerte in Abhängigkeit von der maximalen Länge der Entladungen dargestellt.



**Abbildung 7.20:** Vergleich der maximalen Länge von Entladungen für Entladungen, (mit Zündungen (rot) und ohne Zündung (grün))

Abbildung 7.20 zeigt, dass mit einer Konstantstromregelung erzeugte Entladungen ab einer Nettoleistung von 520 mW ( $P_{Zmin\_const}$ ) und einer Länge größer als 140  $\mu\text{m}$  ( $I_{Zmin\_const}$ ) zünden. Entladungen, die zusätzlich mit einer Leistungsbegrenzung erzeugt werden, zünden bereits ab einer Leistung von 340 mW ( $P_{Zmin\_LB}$ ) und einer Länge größer als 110  $\mu\text{m}$  ( $I_{Zmin\_LB}$ ). Oberhalb dieser Werte treten auch Entladungen auf, die jedoch nicht zündfähig sind. Ursache dafür sind die bereits zuvor angeführten Verluste. Die Ermittlung dieser umfassenden Zusammenhänge kann Gegenstand zukünftiger Forschungsaufgaben sein.

Die vorgenannten Ergebnisse entsprechen der erforderlichen minimalen Nettoleistung für Zündungen (bei der Zündwahrscheinlichkeit von  $Z = 10^{-3}$ ), die den resistiven Kurven für Wasserstoff-Luft-Gemisch ( $\phi(\text{H}_2) = 21\%$ ) der Norm entnommen werden können [JGU10]. Für Spannungen von 15 V bis 30 V ergibt sich eine Nettoleistung von ca. 500 mW. Bei Spannungen unter 15 V erhöht sich die Nettoleistung auf ca. 600 mW.

Die zuvor ermittelte minimale Entladungslänge für eine Zündung, aus der ein minimales wirksames Volumen resultiert, kann als ein Zündkriterium herangezogen werden. Darüber

hinaus ist, wie in Kapitel Temperaturabschätzung beschrieben, die relativ gleichbleibende Temperatur während der Entladung eine weitere Voraussetzung für eine Zündung. Die detailliertere Erforschung dieses Zusammenhanges kann Gegenstand zukünftiger Forschungsaufgaben sein.

Mit diesen ermittelten Grenzwerten bzw. Zündkriterien ist eine Beurteilung der Zündfähigkeit möglich (siehe Abbildung 7.21). Diese vergleicht die Häufigkeit von möglichen maximalen Nettoleistungen bei Worst-Case-Entladungen mit der minimalen Nettoleistung für eine Zündung in Abhängigkeit der Stromwerte. Die maximalen Nettoleistungen werden dabei über die maximale Spannung für die Entladung (vgl. Abbildung 7.9) sowie die Unsicherheit der Kennlinie (vgl. Abbildung 7.8 bzw. Tabelle 4) über die Gleichungen 16 und 17 abgeschätzt.

$$P_{n,max} = [(U_{E,max} - U_V) \cdot I_E] + \delta P \quad (15)$$

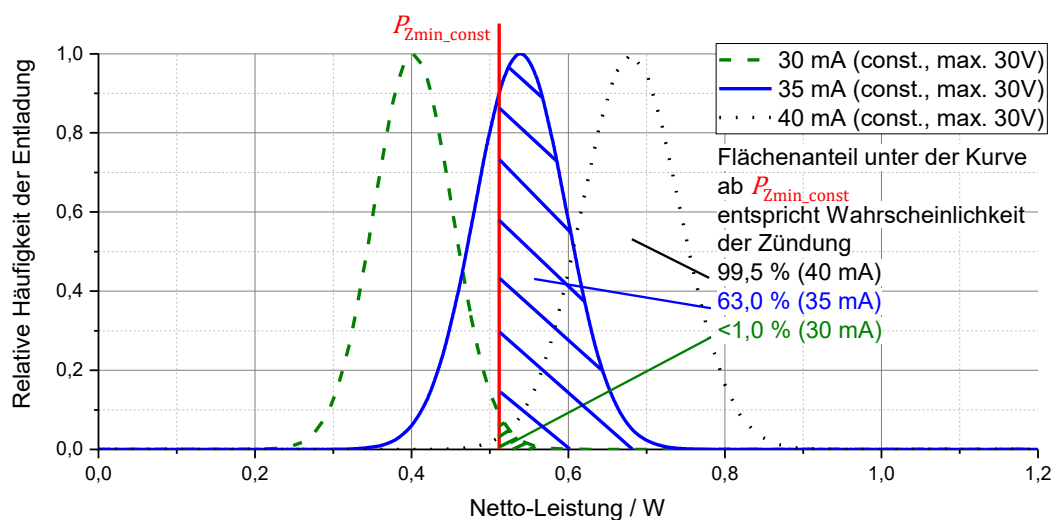
$$P_{n,max} = [(U_{E,max} - U_V) \cdot I_E] + (u_{UKL,k=2} \cdot I_E) \quad (16)$$

Damit ergeben sich für ausgewählte Stromwerte die nachfolgenden Werte (vgl. Tabelle 5).

**Tabelle 5:** Abschätzung der maximalen Nettoleistung

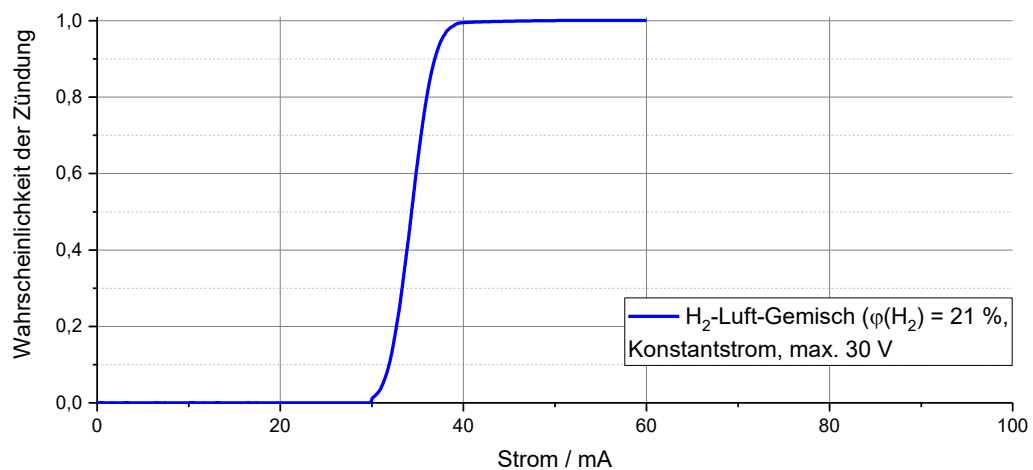
$I_E$	$U_{E,max}$	$P_{n,max}$	$u_{KL} (k=1)$	$\delta P$
30 mA	24,4 V $\pm$ 0,65 V	0,4 W $\pm$ 0,02 W	1,56 V	$\pm$ 0,047 W
35 mA	26,4 V $\pm$ 0,48 V	0,54 W $\pm$ 0,017 W	1,56 V	$\pm$ 0,055 W
40 mA	28,1 V $\pm$ 0,3 V	0,68 W $\pm$ 0,012 W	1,56 V	$\pm$ 0,062 W
60 mA	28,1 V $\pm$ 0,3 V	1,03 W $\pm$ 0,018 W	1,56 V	$\pm$ 0,094 W

Aus der Kombination der Standardabweichung und der Unsicherheit der Leistung ergibt sich die folgende Darstellung.



**Abbildung 7.21:** Maximale Nettoleistung der Worst-Case-Entladungen und minimale Leistung für eine Zündung in Abhängigkeit vom Stromwert

Die in Abbildung 7.21 dargestellten Beispiele der Worst-Case-Entladungen zeigen die Verteilung der maximalen Nettoleistungen entsprechend der Dichtefunktion der Normalverteilung, die sich aus der Standardabweichung der maximalen Spannung und den relevanten Faktoren der erweiterten Messunsicherheit der UI-Kurve ergibt. Die Fläche zwischen der minimalen Leistung für die Zündung und der relativen Häufigkeit der Entladungen mit höheren Leistungen entspricht der Wahrscheinlichkeit für eine Zündung. Diese Wahrscheinlichkeit für eine Zündung in Abhängigkeit des Stromes ist in Abbildung 7.22 dargestellt.



**Abbildung 7.22:** Maximale Nettoleistung der Worst-Case-Entladungen und minimale Leistung für eine Zündung in Abhängigkeit der untersuchten Stromwerte

Die in Abbildung 7.22 dargestellte Wahrscheinlichkeit der Zündung bezieht sich auf das konkrete Wasserstoff-Luft-Gemisch und ist stromkreisspezifisch. Bei der Darstellung dieser Zusammenhänge wurden die Zwischenwerte interpoliert. Für genauere Werte und weitere Situationen sind zusätzliche Messungen bzw. die Ermittlung über dynamische Zusammenhänge erforderlich. Da unter 30 mA keine Entladungen möglich sind, ergibt sich in diesem Bereich eine Wahrscheinlichkeit von 0 [BAR03].

Die vorgenannten Zündkriterien basieren auf einer Vereinfachung der realen Situation, in der weitere Einflüsse wie beispielsweise Strömungen, Konzentrationen der Stoffe, thermochemische Prozesse oder die Bildung von freien Radikalen durch das evtl. vorhandene Nichtgleichgewichtsplasma bei ansonsten gleichen Voraussetzungen über Zündungen oder Nicht-Zündungen entscheiden können. Diese bewirken Streuungen im Grenzbereich, die nur noch statistisch erfasst werden können und in die Wahrscheinlichkeit einfließen [SCH88].

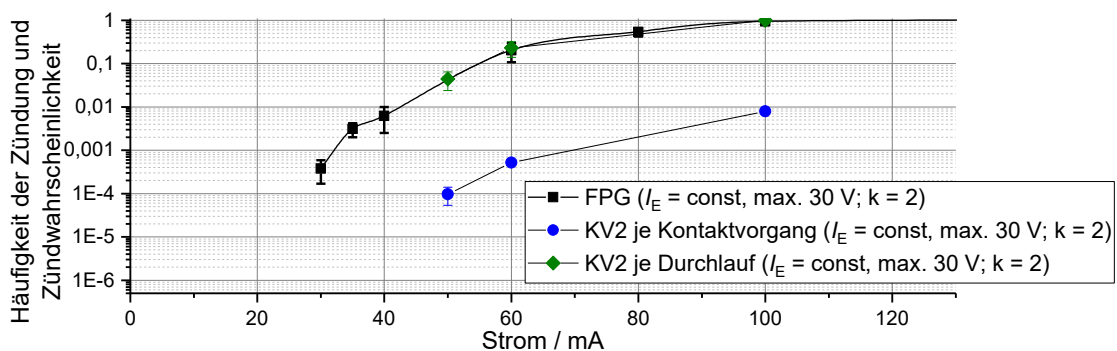
Auf die Häufigkeit der Zündung dieser Entladungen in den Untersuchungen mit dem IEC-Funkenprüfgerät und der Kontaktvorrichtung 2 wird in Kapitel 7.5 eingegangen.



## 7.5 Zündwahrscheinlichkeit und Häufigkeit der Zündung

Die Zündwahrscheinlichkeit ist, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, der in der Norm [INT11] definierte Begriff für die Häufigkeit der Zündung bezogen auf die Umdrehungen des Drahtalters. Für die experimentelle Kontaktvorrichtung wird ebenfalls die Häufigkeit der Zündung ermittelt, die sich jedoch auf den Kontaktvorgang bezieht.

Ergänzend zur IEC-Zündgrenzkurve in Kapitel 2.3 werden hier je Stromwert die mit jeweils 15 Messungen ermittelte Zündwahrscheinlichkeit des IEC-Funkenprüfgerätes sowie die Häufigkeit der Zündung der Kontaktvorrichtung 2 dargestellt. Diese Zündwahrscheinlichkeit variiert in Abhängigkeit der Geräteeigenschaften und wurde mit einem IEC-Funkenprüfgerät ermittelt, das eine sehr abgenutzte Cadmium-Scheibe mit einer sehr rauen Oberfläche verwendet (vgl. Abbildung 7.23).



**Abbildung 7.23:** Häufigkeit der Zündung und Zündwahrscheinlichkeit für 15 Messungen

In Abbildung 7.23 ist für die Messungen mit dem IEC-Funkenprüfgerät (schwarzes Quadrat) die Zündwahrscheinlichkeit von  $Z = 1 \cdot 10^{-3}$  bei einem Stromwert von  $>35$  mA zu erkennen. Den Fehlerbalken ist der Bereich der Streuung zu entnehmen, der teilweise aufgrund der geringen Werte bei der logarithmischen Darstellung klein ausfällt. Die Häufigkeit der Zündung der Kontaktvorrichtung 2 bezogen auf einen einzelnen Kontaktvorgang (blauer Kreis) ist wesentlich geringer und bei 60 mA kleiner als  $10^{-3}$ . Mit der Kontaktvorrichtung 2 wurden ebenfalls Zündungen gemessen, die eine wesentlich kleinere Häufigkeit als  $10^{-4}$  hatten und Aufgrund der geringen Anzahl der Messungen nicht in die Grafik übernommen wurden. Die Häufigkeit der Zündung der Kontaktvorrichtung 2 bezogen auf einen kompletten Durchlauf an der 30 mm langen Kante (grünes Karo) zeigt eine ähnliche Wahrscheinlichkeit wie das Funkenprüfgerät.

Für die in dieser Arbeit untersuchten Entladungen ergeben sich Zündwahrscheinlichkeiten kleiner als  $10^{-3}$ , die somit den Worst-Case-Anforderungen für die Entladungen an der Zündgrenze entsprechen. Aufgrund des anderen Bezuges der Kontaktvorgänge im IEC-Funkenprüfgerät (Viertel-Drehung) stellen die angegebenen Zündwahrscheinlichkeiten nur eine qualitative Aussage für die gemessenen Beispiele dar. Die Zündwahrscheinlichkeit im

IEC-Funkenprüfgerät basiert auf den Kontaktvorgängen (vgl. Kapitel 2.2) und die Anzahl an zündfähigen Entladungen verändert sich entsprechend der Oberflächenbeschaffenheit (vgl. Kapitel 6.1). Aufgrund dieser sich zufällig ändernden Bezugsgröße besteht keine statistische Gleichverteilung (Heteroskedastizität) und kann zur Kontaktvorrichtung 2 nicht umgerechnet werden. Die Zündwahrscheinlichkeit  $10^{-3}$  im IEC-Funkenprüfgerät dient hier somit als Referenzsituation für die Kontaktvorrichtung 2.

.

## 8 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird der grundlegende Ansatz für die Schaffung einer alternativen Prüfmethode zum bisherigen IEC-Funkenprüfgerät vorgestellt. Dies ist notwendig, da die Ergebnisse von Messungen mit dem IEC-Funkenprüfgerät für sicherheitstechnische Beurteilungen sehr stark streuen und die komplexen Phänomene der hier auftretenden Entladungen noch nicht vollständig verstanden sind.

Der Lösungsansatz basiert auf der **Nachbildung der elektrischen Entladungen an der Zündgrenze**, die stromkreisspezifisch bei minimalen Strom- und Spannungswerten gerade noch zünden und hier als **Worst-Case-Entladungen** bezeichnet werden. Im Funkenprüfgerät treten diese Entladungen im Zündgrenzbereich äußerst selten mit einer Zündwahrscheinlichkeit von  $Z \leq 1 \cdot 10^{-3}$  auf.

Für die Analyse von Entladungen an der Zündgrenze ist in dieser Arbeit eine **spezielle experimentelle Kontaktvorrichtung** konzipiert, entwickelt und geschaffen worden. Damit können Worst-Case-Bedingungen ermittelt, Entladungen reproduzierbar erzeugt und mit angemessener Genauigkeit charakterisiert werden. Mit diesen Charakteristiken wird die Entladung zur Beurteilung der Zündfähigkeit nachgebildet. Um die umfassenden Zusammenhänge dafür untersuchen und darstellen zu können, wird sich auf Kontaktöffnungsvorgänge in Wasserstoff-Luft-Gemisch und einen Prüfstromkreis mit Konstantstromregelung sowie Maximalspannungsbegrenzung konzentriert. Dieser Stromkreistyp **unterstützt die Erhaltung der Balance der Worst-Case-Situation der Entladung**, um beispielsweise **zeitlich und örtlich lange** Entladungen zu erzeugen. Die Nutzung von konstanten Stromwerten ermöglicht die Durchführung von systematischen Untersuchungen durch definierte Versuchsbedingungen. Damit können Parameter variiert, Effekte separiert sowie optische Untersuchungen der Entladungen ermöglicht werden. Herausfordernd sind dabei die Dimensionen der Entladung mit einer typischen Länge von 150  $\mu\text{m}$  und einer Zeitdauer im Bereich von 1 bis 4 ms, die zudem eine sehr geringe Strahlungsintensität aufweisen.

Für die Erzeugung der Worst-Case-Entladungen sind folgende Bedingungen erforderlich:

- Es ist eine **Kontaktöffnungsbewegung** zu erzeugen, die durch einen gleitenden Kontaktvorgang, ein anschließendes vorsichtiges Entfernen des Wolfram-Drahtes von der Cadmium-Oberfläche mit einer Öffnungsgeschwindigkeit kleiner als 0,1  $\text{m s}^{-1}$  sowie einer folgenden weiteren Kontaktöffnung mit einer Öffnungsgeschwindigkeit von ca. 0,2  $\text{m s}^{-1}$  gekennzeichnet ist.
- Weiterhin ist am Ende des gleitenden Kontaktvorganges und im Moment des Ablösens des Drahtes eine Phase mit sogenannten **Vorprozessen** erforderlich, in der sich der

Draht in einem Abstand von wenigen Mikrometern bewegt und gleichzeitig viele kleine und zeitlich kurze Entladungen stattfinden.

- Darüber hinaus ist eine bestimmte **Rauheit der Elektrodenoberflächen** notwendig. Es wurde festgestellt, dass dafür eine Vorbehandlung der Oberfläche durch mindestens 10 000 Kontaktvorgänge erforderlich ist. Für das Verständnis dieser Entladungen wurde festgestellt, dass sich auf dem Cadmium Rillen mit Erhebungen und Vertiefungen, Mikropartikeln sowie bis zu 100 µm langen Whiskern bilden. Auf der Anode akkumuliert sich eine Schicht aus Cadmium, auf der ebenfalls Whisker zu finden sind. Diese Oberflächeneigenschaften sind hinsichtlich der Entstehung von Schmelzbrücken und elektrischer Feldverstärkung relevant.
- Es ist eine **Spannungsquelle mit Konstantstromregelung** zu verwenden, die den Strom geeignet nachregelt. Diese ist besonders beim Auftreten des markanten Peaks und bei oszillierendem Spannungsverlauf am Anfang erforderlich.

Mit diesen Vorbedingungen wurden folgende Ergebnisse ermittelt:

- Im Spannungsbereich kleiner als 30 V und im Strombereich von 30 bis 60 mA wurde erstmalig die **Strom-Spannungs-Kennlinie** von Worst-Case-Entladungen an der Zündgrenze von einem Wasserstoff-Luft-Gemisch gemessen. Entladungen im Grenzbereich mit 30 mA zündeten nicht. Ebenso wie im IEC-Funkenprüfgerät zündeten Entladungen ab ca. 35 mA.
- Das **Spektrum** dieser Entladungen wird von Cadmium-Metaldampf dominiert. Ebenfalls wurde Natrium festgestellt, während Spektrallinien von weiteren Elementen in der Nähe der Entladung wie Wasserstoff oder Stickstoff nicht festgestellt werden konnten. Damit kann diese Entladung einer Metaldampfentladung zugeordnet werden, die in der Literatur in Verbindung mit Vakuumentladungen beschrieben wird.
- Es wurden Temperaturen am Ende der Entladung im Bereich von 5 000 bis 10 000 K auf der Basis der Anregungstemperatur der Elektronen und über den elektrischen Leitwert des Plasmas abgeschätzt. Am Anfang der Entladung ist die Anregungstemperatur der Elektronen wesentlich höher als 10 000 K und auch höher als die über den Leitwert ermittelte Temperatur. Dieses weist auf einen Nichtgleichgewichtszustand im Plasma hin. Ein solches Plasma ist für den Zündvorgang relevant, da Plasmen im Nichtgleichgewicht freie Radikale bilden, die den Zündvorgang fördern.
- Bekannte **Zündkriterien** wie die minimale Nettoleistung von ca. 340 mW für erfolgreiche Zündungen wurden für die hier betrachteten Stromkreise bestätigt. Für einen vorgegebenen Stromwert kann somit mithilfe der Drahtbewegung, der Strom-Spannungs-Kennlinien und der maximalen Entladungslängen über den Leistungsverlauf die maximale Nettoleistung der Entladung ermittelt und die Leistung

dafür normalverteilt dargestellt werden. Über die normalverteilte Leistung der Entladung und die stromkreisspezifische **Mindestleistung für eine Zündung** kann über die Verteilungsfunktion der Normalverteilung die **Wahrscheinlichkeit für eine Zündung** berechnet werden.

- Es wurde die **Häufigkeit** der Zündung für Worst-Case-Entladungen mit der experimentellen Kontaktvorrichtung und dem IEC-Funkenprüfgerät ermittelt. Auf der Basis des Stromwertes konnte bestätigt werden, dass die Zündgrenze der experimentellen Kontaktvorrichtung mit der Zündgrenze des IEC-Funkenprüfgerätes vergleichbar ist.

Aus den Untersuchungen dieser Arbeit resultiert, dass das IEC-Funkenprüfgerät die Bedingungen funktionsbedingt so lange variiert, bis sich unter den vielfältigen und zufälligen Einflüssen die stromkreisspezifischen Worst-Case-Bedingungen für eine Zündung ergeben. Diese Zusammenhänge zwischen der Entladung und der Zündung lassen sich als **ersten grundlegenden Ansatz** für die Beurteilung einer Zündung in dieser Arbeit darstellen. Mit den Ergebnissen stehen **für den hier gewählten Stromkreistyp erste Daten** für eine Nachbildung bzw. eine Simulation zur Verfügung: der Verlauf des Elektrodenabstandes bzw. der Entladungslänge, der Verlauf der Leistung sowie die vorgenannten Randbedingungen. Damit ist eine aus der Physik der Entladung abgeleitete reproduzierbare Nachbildung der Entladung mit Worst-Case-Bedingungen möglich. Dies ermöglicht zudem auch eine Bewertung der Messergebnisse über die kombinierte Messunsicherheit nach GUM. Über die normalverteilte maximale Nettoleistung einer Entladung und das Zündkriterium kann eine **Wahrscheinlichkeit für eine Zündung** ermittelt werden.

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Prüfmethode unterscheiden sich von den Ergebnissen, die mit dem IEC-Funkenprüfgerät ermittelt wurden. Im Unterschied zum IEC-Funkenprüfgerät werden hier nur die Worst-Case-Entladungen berücksichtigt, die deutlich reproduzierbarere Ergebnisse ermöglichen. Dabei entsprechen die Zündgrenzwerte der Nachbildung einer äquivalenten Zündwahrscheinlichkeit des IEC-Funkenprüfgerätes.

## 9 Ausblick

Auf der Grundlage der physikalisch-mathematischen Zusammenhänge zur Zündfähigkeitsbewertung von elektrischen Entladungen bei Kontaktöffnungsvorgängen wurde eine Nachbildung der Entladung für einen Stromkreistyp dargestellt. Diese basiert auf einem quasistationären Ansatz.

Für den hier untersuchten Stromkreistyp sind weitere Einflüsse auf die Worst-Case-Situation zu analysieren. Dafür sind detailliertere Kenntnisse der multiphysikalischen Grundlagen wie die Transportparameter des Plasmas, der Einflüsse der Vorprozesse auf die Zündung, der Einflüsse von Nano- oder Mikroentladungen sowie der Einflüsse von Mikropartikeln auf die Entladung und den Prozessverlauf der Zündung erforderlich. Ein mit diesen Kenntnissen erweitertes physikalisch-mathematisches Modell, möglichst mit einer **physikalischen Verallgemeinerung** wie beispielsweise in Khakpour [KFU15] beschrieben, würde eine umfassende Simulation der Entladung ermöglichen. Ebenfalls wäre das **dynamische Verhalten** der Metaldampfentladung, wie es beispielsweise in Berger [BER10] beschrieben wird, zu untersuchen, um die Ergebnisse auf weitere Situationen wie beispielsweise resistive Stromkreise übertragen zu können. Für induktive Stromkreise sind für Untersuchungen an der Zündgrenze schnellere Kontaktöffnungen erforderlich.

Ein weiterer Schritt ist die Durchführung von Untersuchungen für **weitere Kontaktsituationen** wie beispielsweise Kontaktschließvorgänge und damit verbunden andere Stromkreistypen wie z. B. kapazitive Stromkreise.

Diese vorgenannten Grundlagenuntersuchungen können die Basis für eine umfassend anwendbare Nachbildung der Entladung zur **Entwicklung einer alternativen Prüfmethode** bilden.

Die ermittelte quasistationäre Lichtbogenkennlinie und die Zündkriterien ermöglichen eine erste Nachbildung für eine Simulation und Digitalisierung. Mit weiteren Messmethoden wie beispielsweise der Anwendung einer 3-D-Längenermittlung, ließe sich die **Messunsicherheit** reduzieren und vorhandene Einflüsse könnten genauer beurteilt werden. Weiterhin kann mit Bezug auf die Annahme des Nichtgleichgewichtszustandes des Plasmas am Anfang der Entladung eine Untersuchung über die Bildung von freien Radikalen [LAN13] und deren Wirkung auf den Zündprozess durchgeführt werden.

Die Ergebnisse können dann in einer Nachbildung bzw. einer Simulation und letztendlich in einem elektronischen Prüfgerät oder einer Software umgesetzt werden. Mit dieser Arbeit liegt somit eine erste Grundlage für die Schaffung einer Alternative zum IEC-Funkenprüfgerät vor.

## **Anhang**

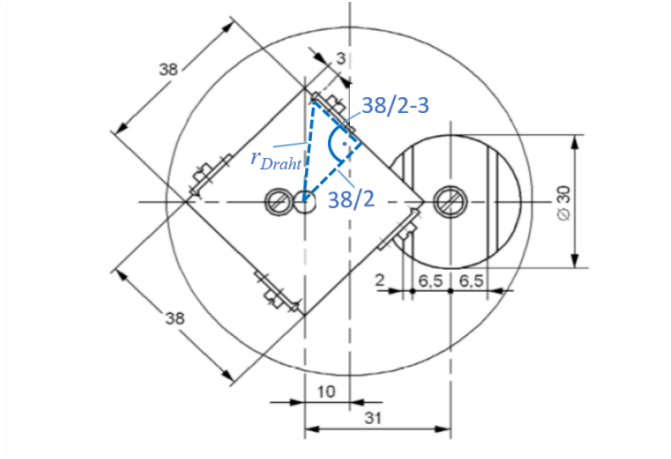
## Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<b>Anhang A: Mechanische Zusammenhänge im Funkenprüfgerät .....</b>	<b>82</b>
<b>Anhang B: Berechnungen zu Schmelzbrücken und Whiskern.....</b>	<b>84</b>



## Anhang A: Mechanische Zusammenhänge im Funkenprüfgerät

Die generelle Elektrodenbewegung wird durch die Mechanik des Funkenprüfgerätes bestimmt. Die Mechanik mit Maßangaben ist in der folgenden Abbildung A.1 dargestellt.



**Abbildung A.1:** Draufsicht der Kontaktvorrichtung mit den Maßangaben zur Berechnung der Bewegungsbahn des Drahtes [INT11]

Der Radius der Drahtbahn der Anode ergibt sich über das in Abbildung A.1 dargestellte blaue gestrichelte Dreieck zu:

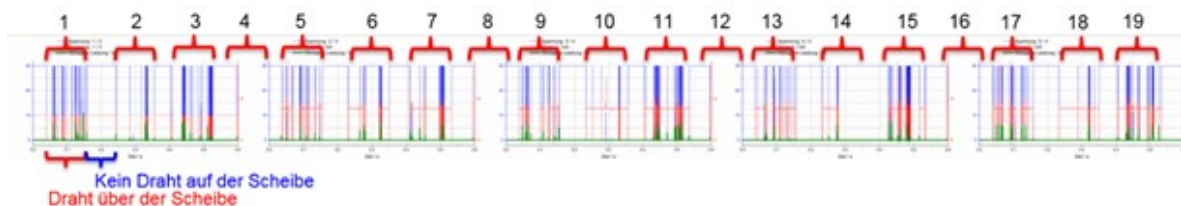
$$r_{\text{Draht}} = \sqrt{\left(\frac{38 \text{ mm}}{2}\right)^2 + \left(\frac{38 \text{ mm}}{2} - 3 \text{ mm}\right)^2} = 24,8 \text{ mm} \quad (17)$$

Damit ergibt sich folgende Umfangsgeschwindigkeit des Drahtes:

$$v_{\text{Draht}} = 2 \cdot r_{\text{Draht}} \cdot \pi \cdot 80 \frac{\text{U}}{\text{min}} \cdot \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{\text{m}}{1000 \text{ mm}} = 0,208 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (18)$$

Mit dieser theoretischen Geschwindigkeit gleitet der Draht für berechnete 118 ms auf der Scheibe und anschließend bis zum folgenden Draht ist das Funkenprüfgerät für 69 ms ohne Kontakt (vgl. auch Abbildung 2.2 in Abschnitt) Die ausführliche Berechnung ist bei Thedens [THE02] aufgeführt.

Diese generellen Zusammenhänge sind gut in den Spannungs- und Stromverläufen des IEC-Funkenprüfgerätes zu erkennen (vgl. Abbildung A.2).



**Abbildung A.2:** Beispielhafte Spannungsverläufe (blau), Stromverläufe (rot) für 19 Kontaktvorgänge im IEC-Funkenprüfgerät

In Abbildung A.2 ist ein Beispiel mit dem Verlauf der elektrischen Werte dargestellt, in dem 19 Kontaktvorgänge bis zur Zündung abgebildet sind. Die Zeiträume, in denen der Draht Kontakt zur Scheibe hat, sowie die Zeiträume dazwischen ohne Kontakt sind mit roten Klammern gekennzeichnet. Aufgrund der mechanischen Verknüpfung zwischen dem Drahthalter und der Cadmiumscheibe wiederholt sich die Drahtbewegung alle 25 Kontaktvorgänge. Die Wiederholung ist ebenfalls in den Spannungsverläufen zu erkennen.

## Anhang B: Berechnungen zu Schmelzbrücken und Whiskern

Die in der Literatur angegebenen Zusammenhänge für Schmelzbrücken und Drahtexplosionen zeigen, dass eine Verdampfung von Cadmium sehr einfach und wahrscheinlich möglich ist. Die Abschätzung über das Gesetz [ES74] von Wiedemann-Franz-Lorenz mit der Wiedemann-Lorenz-Zahl  $L = 2,4 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2 \text{ K}^{-2}$  sowie den Schmelztemperaturen  $T_{\text{Schmelz}} = 594,5 \text{ K}$  und Siedetemperaturen  $T_{\text{Siede}} = 1038,15 \text{ K}$  [MS05] ergibt nachfolgende Spannungen.

$$U_{\text{Schmelz}} = \sqrt{(T_{\text{Schmelz}}^2 - T_0^2) \cdot 4L} \quad (19)$$

$$U_{\text{Schmelz}} = \sqrt{[(594,05 \text{ K})^2 - (293,15 \text{ K})^2] \cdot 4 \cdot 2,4 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{V}}{\text{K}}\right)^2} = 160 \text{ mV} \quad (20)$$

$$U_{\text{Siede}} = \sqrt{[(1038,15 \text{ K})^2 - (293,15 \text{ K})^2] \cdot 4 \cdot 2,4 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{V}}{\text{K}}\right)^2} = 309 \text{ mV} \quad (21)$$

In der Literatur wird angemerkt, dass die Gleichung nur beschränkt gültig ist. Daher ist das Ergebnis als Tendenz zu betrachten. Es gibt auch weitere Varianten der Temperaturabschätzung, aus den sich Ergebnisse in ähnlichen Spannungsbereichen ergeben [SLA14]. Für das Erreichen der Schmelztemperaturen sind daher nur geringe Kontaktspannungen von ca. 160 mV erforderlich, die auf alle Fälle überschritten werden. Im Spannungsverlauf ist ein solcher Peak nur schwer erkennbar, da der Spannungsverlauf in der Praxis von einer oszillierenden Spannung überlagert wird.

Für das Verdampfen des Whiskers bei einer Drahtexplosion bestehen für Cadmium folgende Zusammenhänge über das Schmelzintegral [BER17]:

$$\frac{\gamma \cdot c_{\text{Cd}}}{\rho} = 8,65 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 0,232 \frac{\text{Ws}}{\text{g K}} \cdot 14,3 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{Vm}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0,29 \cdot 10^6 \frac{\text{A}^2 \text{s}}{\text{cm}^2 \text{K}} \quad (22)$$

Bei einem Whisker mit 1  $\mu\text{m}$  Durchmesser ergibt sich folgende Stromdichte:

$$S_I = \frac{I_E}{A_Q} = \frac{60 \text{ mA}}{\frac{(0,0001 \text{ cm})^2 \pi}{4}} = 7,6 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \quad (23)$$

Damit kann die Abschmelzzeit wie folgt berechnet werden:

$$t_s = \frac{\frac{\gamma \cdot c_{\text{Cd}}}{\rho} \cdot (T_{\text{Siede}} - T_0)}{S^2} = \frac{0,29 \cdot 10^6 \frac{\text{A}^2 \text{s}}{\text{cm}^2 \text{K}} \cdot (1038,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K})}{\left(7,6 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}\right)^2} \quad (24)$$

Mit der Siedetemperatur ergibt sich eine Abschmelzzeit von ca. 4 Mikrosekunden. Diese Zeit kann man in den Spannungsverläufen ebenfalls nur schwer wahrnehmen. Die Abschätzungen

zeigen jedoch, dass Schmelzbrücken und Drahtexplosionen uneingeschränkt möglich sind. Anzumerken ist, dass die Praxiswerte nicht ideal und beispielsweise Fremdelemente wie Cadmiumoxid vorhanden sind und daher abweichen.

## Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
$a^A$	V	Parameter der Gleichung nach Ayrton für die Fallspannung
$A_Q$	$m^2$	Querschnittsfläche
$A\cdot$	$s^{-1}$	Übergangswahrscheinlichkeit
$b^A$	$V\ m^{-1}$	Parameter der Gleichung nach Ayrton
$c$	1	Signifikanz
$c_{Cd}$	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität
$C$	F	Kapazität
$c^A, d^A$	VA, $VA\ m^{-1}$	Parameter der Gleichung nach Ayrton
$d$	m	Elektrodenabstand
$e$		elektrische Ladung
$E_{min}$	J	minimale Energie
$E_k$	$V\ m^{-1}$	kritische Durchschlagfeldstärke
$E_u$	eV	unteres Energieniveau
$g$	$A\ V^{-1}$	Leitwert der Entladung
$g_u$	1	Statistisches Gewicht
$I_E$	A	Stromwert der Entladung
$I_{GK}$	A	Stromwert der Grenzkurve
$I_{Zmin\_const}$	A	Mindeststromwert für eine Zündung bei Konstantstromregelung
$I_{Zmin\_LB}$	A	Mindeststromwert für eine Zündung mit einer Leistungsbegrenzung
$l_E$	m	Entladungslänge
$l_{ES}$	m	Länge der Säule der Entladung
$k$	1	Überdeckungsfaktor zu einer Unsicherheit
$k_B$	$J\ K^{-1}$	Boltzmann-Konstante
$KV$	1	Anzahl von Kontaktvorgängen

Symbol	Einheit	Bedeutung
$l$	m	Entladungslänge
$L$	H	Induktivität
$m$	eV <sup>-1</sup>	Steigung im Boltzmann-Plot
$P$	W	elektrische Leistung
$P_{ab}$	W	Abgegebene Leistung der Entladung
$P_n$	W	Nettoleistung der Entladung, d. h. ohne den Anteil der Verlustspannung
$P_{n,max}$	W	maximale Nettoleistung der Entladung, d. h. ohne den Anteil der Verlustspannung
$P_{Zmin\_const}$	W	minimale Nettoleistung für eine Zündung mit Konstantstromregelung
$P_{Zmin\_LB}$	W	minimale Nettoleistung für eine Zündung mit Leistungsbegrenzung
$r_{Draht}$	m	Radius der Drahtumlaufbahn
$r_{ign}$	m	Radius des Initialvolumens
$R$	$\Omega$	elektrischer Widerstandswert
$S$	1	relative Strahlungsintensität
$SF$	1	Sicherheitsfaktor
$S_I$	A m <sup>-1</sup>	Stromdichte
$S_{pk}$	$\mu\text{m}$	Rauheitskennwert der Erhebungen
$S_{vk}$	$\mu\text{m}$	Rauheitskennwert der Vertiefungen
$t$	s	Zeit
$t_{ign}$	s	Zünddauer
$t_s$	s	Abschmelzzeit
$T$	K	Thermodynamische Temperatur
$T_{Anregung}$	K	Anregungstemperatur eines Plasmas
$T_{Elektronen}$	K	Elektronentemperatur eines Plasmas
$T_{Ionisation}$	K	Ionisationstemperatur eines Plasmas
$T_{Rotation}$	K	Rotationstemperatur eines Plasmas

Symbol	Einheit	Bedeutung
$T_{\text{Schmelz}}$	K	Schmelztemperatur
$T_{\text{Siede}}$	K	Siedetemperatur
$u, u_{k=2}$	$\mu\text{m}$	Unsicherheitsbeitrag der Längenmessung
$u_{\text{IE}}, u_{\text{IE},k=2}$	A	Unsicherheitsbeitrag der Strommessung
$u_{\text{UE}}, u_{\text{UE},k=2}$	V	Unsicherheitsbeitrag der Spannungsmessung
$u_{\text{IKL}}, u_{\text{IKL},k=2}$	A	Unsicherheitsbeitrag des Stroms der Kennlinie für $k = 1$ bzw. $k = 2$
$u_{\text{UK}}, u_{\text{UKL},k=2}$	V	Unsicherheitsbeitrag der Spannung der Kennlinie für $k = 1$ bzw. $k = 2$
$U_{\text{A}}$	V	Anodenfallspannung
$U_{\text{D}}$	V	Durchschlagspannung
$U_{\text{E}}$	V	Spannungswert der Entladung
$U_{\text{Emax}}$	V	maximaler Spannungswert einer Entladung
$U_{\text{F}}$	V	Fallspannungen der Entladung
$U_{\text{GK}}$	V	Spannungswert der Grenzkurve
$U_{\text{K}}$	V	Kathodenfallspannung
$U_{\text{Schmelz}}$	V	Schmelzspannung
$U_{\text{Siede}}$	V	Siedespannung
$U_{\text{V}}$	V	Verlustspannung
$U_0$	V	Quellenspannung
$V$	$\text{m s}^{-1}$	Geschwindigkeit im Strömungsfeld
$v_{\text{Draht}}$	$\text{m s}^{-1}$	Geschwindigkeit des Drahtes
$W_{\text{brutto}}$	Ws, J	Bruttoenergie, d. h. die elektrisch zugeführte Energie
$W_{\text{netto}}$	Ws, J	Nettoenergie, d. h. ohne den Anteil der Verlustspannung
$x$	1	Ort
$Y$	1	Verteilung der Spezies
$Z$	1	Zündwahrscheinlichkeit

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	°	Winkel des Versatzes des Drahthalters zur Cadmiumscheibe
$\beta$	1	Feldverstärkungsfaktor
$\delta I_{\text{Abtastung}}$	µm	Messunsicherheitsbeitrag durch die Abtastraten des Oszilloskops und der Aufnahmezeit der Kamera
$\delta I_{\text{Auflösung}}$	µm	Messunsicherheitsbeitrag durch die min. Auflösung des optischen Systems
$\delta I_{\text{3D-Abweichung}}$	µm	Messunsicherheitsbeitrag durch die Ermittlung von 3-D-Längen über 2-D-Bildaufnahmen
$\delta I_{\text{Stromzange}}$	A	Messunsicherheitsbeitrag durch die Stromzange bzw. Oszilloskop
$\delta P$	W	erweiterte Messunsicherheit der Leistung
$\delta U_{\text{Fit}}$	V	Messunsicherheitsbeitrag zur Spannung durch den Fit
$\delta U_{\text{Länge}}$	V	Messunsicherheitsbeitrag zur Spannung durch die Längenmessung
$\delta U_{\text{Tastkopf}}$	V	Messunsicherheitsbeitrag durch den Tastkopf bzw. Oszilloskop
$\gamma$	kg m <sup>3</sup>	Dichte
$\lambda$	nm	Wellenlänge
$\mu$	1	Erwartungswert der Normalverteilung
$\varphi$	1	Volumenanteil
$\rho$	Vm A <sup>-1</sup>	spezifischer Widerstand
$\sigma$	1	Standardabweichung
$\sigma_E$	S m <sup>-1</sup>	elektrische Leitfähigkeit
$\tau$	s	Zeitkonstante des dynamischen Verhaltens der Entladung nach Mayr'



## Abkürzungsverzeichnis

ASD	<b>A</b> tomic <b>S</b> pectra <b>D</b> atabase
CdO	<b>C</b> admium <b>o</b> xid
CLSM	<b>C</b> onfocal <b>L</b> aser <b>S</b> canning <b>M</b> icroscope (konfokales Laser-Scanning-Mikroskop)
CTE	<b>C</b> omplete <b>t</b> hermal <b>e</b> quilibrium
DUT	<b>D</b> evice <b>u</b> nder <b>t</b> est (zu prüfender elektrischer Stromkreis)
FPG	IEC-Funken <b>p</b> rüfgerät
GUM	<b>G</b> uide to the <b>U</b> ncertainty of <b>M</b> easurement
HWB	<b>H</b> alb <b>w</b> ärts <b>b</b> reite
IEC	<b>I</b> nternational <b>E</b> lectrotechnical <b>C</b> ommission
KV1, KV2	<b>K</b> ontakt <b>v</b> orrichtungen 1 und 2
LTE	<b>L</b> ocal <b>t</b> hermal <b>e</b> quilibrium
LTG	<b>L</b> okales <b>t</b> hermodynamische <b>G</b> leichgewicht
MESG	<b>M</b> aximum <b>E</b> xperimental <b>S</b> afe <b>G</b> ap (maximale flammendurchschlagssichere Spaltweite)
MIE	<b>M</b> inimum <b>I</b> gnition <b>E</b> nergy (Mindestzündenergie)
MZE	<b>M</b> indest <b>z</b> ünd <b>e</b> nergie
NIST	<b>N</b> ational <b>I</b> nstitute of <b>S</b> tandards and <b>T</b> echnology
NTP	<b>N</b> on- <b>t</b> hermal <b>p</b> lasma (nichtthermisches Gleichgewichtsplasma)
OES	<b>o</b> ptische <b>E</b> mission <b>s</b> pektroskopie
PTB	<b>P</b> hysikalisch- <b>T</b> echnische <b>B</b> undesanstalt
PTP	<b>P</b> roficiency <b>T</b> esting <b>P</b> rogram
REM	<b>R</b> asterelektronen <b>m</b> ikroskop
TLS	<b>T</b> otal <b>L</b> east <b>S</b> quare
vgl.	<b>v</b> erg <b>l</b> eiche
VTG	<b>v</b> ollständiges <b>t</b> hermisches <b>G</b> leichgewicht
WO <sub>2</sub> , WO <sub>3</sub>	<b>W</b> olfram <b>d</b> ioxid, <b>W</b> olfram <b>t</b> rioxid

## Literaturverzeichnis

- [ACT96] **Acton Research Corporation** **Acton Research Corporation: Operating Instructions SpectraPro-300i**. 0.300 Meter Focal Length Triple Grating Imaging Monochromator/Spectrograph, Acton (MA, USA), 1996.
- [AGS10] **Ammerman, R. F. et al.**: *DC-Arc Models and Incident-Energy Calculations*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, Vol. 46 (5), S. 1810 – 1819, DOI: 10.1109/TIA.2010.2057497.
- [AYR02] **Ayrton, H.**: *The Electric Arc*. The D. Van Nostrand Company, New York, 1902.
- [BAR03] **Babrauskas, V.**: *Ignition handbook*. Fire Science Publishers, Issaquah (WA, USA), 2003.
- [BCT10] **Bowman, S. et al.**: *Kinetics of Low-Temperature Hydrogen Oxidation and Ignition by Repetitively Pulsed Nonequilibrium Plasmas*. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2010.
- [BEC11] **Bechtloff, J.**: *Messtechnik*. Vogel-Verlag, Würzburg, 2011.
- [BEH10] **Behrens, V.**: *Elektrische Kontakte*. Werkstoffe, Gestaltungen und Anwendungen in der Nachrichten-, Automobil- und Energietechnik. expert verlag, Renningen, 2010.
- [BER10] **Berger, S.**: *Modell zur Berechnung des dynamischen elektrischen Verhaltens rasch verlängerter Lichtbögen*. Dissertation, ETH Zürich, 2010, DOI: 10.3929/ETHZ-A-006038153.
- [BER17] **Berger, F.**: *Skript LV „Lichtbogen und Kontaktphysik“*, TU Ilmenau, 2017.
- [BEY92] **Beyer, M.**: *Hochspannungstechnik*. Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung. Springer, Berlin, 1992.
- [BJE87] **Ben Jemaa, N.**: *Theoretical and experimental laws of anodic and cathodic arc duration on break at low electrical level*. Journal of Physics D: Applied Physics, 1987, Vol. 20, S. 468 – 475, DOI: 10.1088/0022-3727/20/4/011.
- [BM08] **Brandes, E.; Möller, W.**: *Sicherheitstechnische Kenngrößen*. Brennbare Flüssigkeiten und Gase. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2008.

- [BM12] **Beyer, M.; Markus, D.:** *Ignition of explosive atmosphere by small hot particles: Comparison of experiments and simulations*. Science and Technology of Energetic Materials, 2012.
- [BOR57] **Borchert, L.:** *Ursachen der Zerstörung von schwach belasteten Kontakten der Nachrichtentechnik und Kontaktschutz durch eine Funkenlöschung*. ETZ-A, 1957, Bd. 78, S. 702 – 712.
- [BOU94] **Boulos, M. I.; Fauchais, P.; Pfender, E.:** *Thermal plasmas*. Fundamentals and applications. Plenum Press, New York (NY, USA), 1994.
- [BRO02] **Broekaert, J. A. C.:** *Analytical Atomic Spectrometry with Flames and Plasmas*. Wiley-VCH, Weinheim, 2002, DOI: 10.1002/3527606653.
- [BSM95] **Boxman, R.L.; Sanders, D. M.; Martin, P. J. Hrsg.:** *Handbook of vacuum arc science and technology*. Fundamentals and applications. Noyes Publications, Park Ridge, (NJ, USA), 1995.
- [BU70] **Boddy, P. J.; Utsumi, T.:** *Observations on the field-distance relationship for short arcs between gold electrodes*. Proceedings of 5th Conference on Electrical Contact Phenom, 1970.
- [BZ93] **Bartknecht, W.; Zwahlen, G.:** *Explosionsschutz*. Grundlagen und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin [u. a.], 1993, DOI: 10.1007/978-3-642-77515-4.
- [CAP72] **Capp, B.:** *The power balance in electrode-dominated arcs with a tungsten anode and a cadmium or zinc cathode in nitrogen*. Journal of Physics D: Applied Physics, 1972, Vol. 5, S. 2170.
- [CAS39] **Cassie, A. M.:** *A New Theory of Rupture and Circuit Severity*. CIRGE-Ber. Nr. 102, 1939.
- [CGJ52] **Calcote, H. F. et al.:** *Spark Ignition - Effect of Molecular Structure*. Industrial Engineering & Chemistry, 1952, 44 (11), S. 2656 – 2662, DOI: 10.1021/ie50515a048.
- [CRW91] **Chatterton, P.A. et al.:** *A self-compensating Langmuir probe for use in rf (13.56 MHz) plasma systems*. Vacuum, 1991, Vol. 42 (7), S. 489 – 493, DOI: 10.1016/0042-207X(91)90022-B.
- [CVM95] **Cernak, M. et al.:** *Effect of cathode surface properties on glow-to-arc transition in a short positive corona gap in ambient air*. Journal of Physics D Applied Physics, 1995, Vol. 28 (6), S. 1126, DOI: 10.1088/0022-3727/28/6/015.

- [DB71] **Davies, D. K.; Biondi, M. A.:** *Mechanism of dc Electrical Breakdown between Extended Electrodes in Vacuum*. Journal of Applied Physics, 1971, 42, S. 3089 – 3107, DOI: 10.1063/1.1660690.
- [DE90] **Dunn, G. J.; Eagar, T. W.:** *Calculation of Electrical and Thermal Conductivities of Metallurgical Plasmas*. Welding Research Council bulletin, 1990.
- [DKE12] **DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE:** *Explosionsgefährdete Bereiche - Teil 11: Geräteschutz durch Eigensicherheit "i" (IEC 60079-11:2011 + Cor.:2012); Deutsche Fassung EN 60079-11:2012*. VDE VERLAG GMBH, Berlin, 2012.
- [EMM17] **Essmann, S.; Markus, D.; Maas, U.:** *Investigation of the Flame Kernel Propagation after Ignition a Low Energy Electrical Discharge*. International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS), 2017.
- [ES74] **Erk, A.; Schmelzle, M.:** *Grundlagen der Schaltgerätetechnik*. Kontaktglieder und Löscheinrichtungen elektrischer Schaltgeräte der Energietechnik. Springer-Verlag, Berlin, 1974.
- [EUR11]: **RICHTLINIE 2011/65/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten**. RICHTLINIE 2011/65/EU: Amtsblatt der Europäischen Union, 2011.
- [FAE86] **Faerstein, L. B.:** *Vlijanie uslovij kommutacij na vosplamenjajuščuju sposobnost' šachtnych slabotočnych cepej i razrabotka sposobov ocenki ich iskrobezopasnosti*. Dissertation, Moskau, 1986.
- [FAN06] **Fantz, U.:** *Basics of plasma spectroscopy*. Plasma Sources Science and Technology, 2006, Vol. 15 (4), S. 137 – 147, DOI: 10.1088/0963-0252/15/4/s01.
- [FK11] **Fridman, A.; Kennedy, L. A.:** *Plasma physics and engineering*. CRC Press, Boca Raton (FL, USA), 2011.
- [FRA16] **Frank-Kamenetskii, D. A.:** *Diffusion and Heat Exchange in Chemical Kinetics*. Princeton University Press, Princeton, 2016.
- [FRE65] **Freytag, H. H. Hrsg.:** *Handbuch der Raumexplosionen*. Verlag Chemie GmbH, Weinheim, 1965.
- [GLA93] **Glassman, I.:** *Combustion*. Academic Press, San Diego, 1993, DOI: 10.1002/ep.670120219.
- [GM97] **Gerlach, U.; Markus, D.:** *PTB-Jahresbericht*, Braunschweig, 1997.

- [GOB75] **Gobrecht, H. Hrsg.:** *Bergmann-Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik*. Band IV, Teil 1 Aufbau der Materie. de Gruyter, Berlin, 1975.
- [GOR17] **Gortschakow, S:** *Daten der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur von Cadmiumdampf*. E-Mail, Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie, Greifswald, 2017.
- [GRA67] **Grakov, V. E.:** *Cathode fall of an arc discharge in a pure metal I*. Soviet Physics - Technical Physics, 1967, Vol. 12 (2), S. 286 – 292.
- [GRI97] **Griem, H. R.:** *Principles of plasma spectroscopy*. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [GSU13] **Gorchakov, S. et al.:** *Einsatz optischer Analysemethoden zur Charakterisierung von Schaltlichtbögen*. Kontaktverhalten und Schalten, VDE-Fachbericht, 2013, Vol. 69, S. 179 – 186.
- [GV14] **Go, D. B.; Venkattraman, A.:** *Microscale gas breakdown*. Ion-enhanced field emission and the modified Paschen's curve. J. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, Vol. 47 (50), S. 503001, DOI: 10.1088/0022-3727/47/50/503001.
- [GW99] **Gerlach, U.; Wagner, S.:** *Feldbusanschaltung mit Wechselstromspeisung für die Zündschutzart Eigensicherheit*. Dissertation, TU Braunschweig, 1999.
- [GY08] **Glassman, I.; Yetter, R. A.:** *Combustion*. Academic Press, Amsterdam, Boston u. a., 2008.
- [HAM16] **Hamamatsu Photonics:** *High-Speed Gated Image Intensifier Units C10880-03C/-03F/-13C/-13F*, 23.08.2018 (abgerufen), [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/C10880-03C\\_-03F\\_TII1055E.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/C10880-03C_-03F_TII1055E.pdf).
- [HEG07] **Hegenbart, A. C.:** *Analyse und Überwachung von Plasmaprozessen für die Kunststoffverarbeitung mittels optischer Emissionsspektroskopie (OES)*. Dissertation, RWTH Aachen, 2007.
- [HOL67] **Holm, R.:** *Electric Contacts*. Theory and applications. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1967, DOI: 10.1007/978-3-662-06688-1.
- [IET06] **IET LABS, INC. formerly manufacturer by GenRad:** *1689/1689M SERIES Precision RLC Digibridge User and Service Manual*, 23.08.2018, [https://www.ietlabs.com/pdf/Manuals/1689\\_im.pdf](https://www.ietlabs.com/pdf/Manuals/1689_im.pdf).
- [INT10] **International Electrotechnical Commission:** *IEC 60079-25 Explosive atmospheres – Part 25: Intrinsically safe electrical systems*. IEC, Genf (CH), 2010.

- [INT11] **International Electrotechnical Commission:** *IEC 60079-11 Explosive atmospheres – Part 11: Equipment protection by intrinsic safety "i"*. IEC, Genf (CH), 2011.
- [JGU10] **Johannsmeyer, U.; Gerlach, U.; Uehlken, T.:** *Sicherheitsrelevante Parameter „Netto“-Betrachtung von maximalen Funkenleistungen*. Beitrag für die IEC 60079-11 Maintenance Team-Tagung, Seattle, USA, 2010.
- [JK99] **Johannsmeyer, U.; Krämer, M.:** *Zusammenschaltung nichtlinearer und linearer eigensicherer Stromkreise*. PTB-Bericht PTB-ThEx-10, 1999.
- [JMB17] **Janda, M. et al.:** *Influence of repetition frequency on streamer-to-spark breakdown mechanism in transient spark discharge*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, Vol. 50 (42), DOI: 10.1088/1361-6463/aa8940.
- [Joh79] **Johannsmeyer, U.:** *Zündverhalten von Netzwerken eigensicherer Stromkreise mit elektronischen Strombegrenzungseinrichtungen*. PTB-Bericht PTB-W-16, 1997.
- [Joh84] **Johannsmeyer, U.:** *Zündung explosionsfähiger Gemische durch kurzzeitige Schließfunken in kapazitiven Stromkreisen für die Zündschutzart Eigensicherheit*, Dissertation, TU Braunschweig, 1984.
- [JOI95] **Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM):** *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 1995.
- [JOS39] **Jost, W.:** *Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1939, DOI: 10.1007/978-3-642-50651-2.
- [JÜT88] **Jüttner, B.:** *Vacuum breakdown*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1988, Vol. 268 (2 – 3), S. 390 – 396, DOI: 10.1016/0168-9002(88)90541-4.
- [KEY75] **Kravchenko, V. S.; Erygin, A. T.; Yakovlev, V. A.:** *Critical duration of an electrical discharge for ignition of methane-Air and hydrogen-Air mixtures*. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1975, Vol. 9 (4), S. 523 – 524, DOI: 10.1007/BF00743102.
- [KFU15] **Khakpour, A. et al.:** *Electrical Arc Model Based on Physical Parameters and Power Calculation*. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43, S. 2721 – 2729, DOI: 10.1109/TPS.2015.2450359.

- [KIN57] **Kind, D.:** *Die Aufbaufläche bei Stoßbeanspruchung technischer Elektrodenanordnungen in Luft*, Dissertation, TU München. Dissertation, TH München, 1957.
- [KRÄ03] **Krämer, M.:** *Die Bewertung der Zündfähigkeit eigensicherer Stromkreise anhand eines Rechenverfahrens*. PTB-Mitteilungen, 2003, S. 137 – 142.
- [KRA18] **Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team:** *Atomic Spectra Database Lines Data Cadmium*. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.3), [Online], 9.2.2018, <https://physics.nist.gov/asd>, DOI: 10.18434/T4W30F.
- [KWK13] **Klausmeyer, U. et al.:** *Einführung des internationalen „PTB Ex Proficiency Testing Scheme“ für Vergleiche zwischen Ex-Laboratorien*. 13. BAM-PTB-Kolloquium zur chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik, 2013.
- [KWK14] **Klausmeyer, U. et al.:** *Internationales „PTB EX PROFICIENCY TESTING SCHEME“ für Vergleiche zwischen Ex-Laboratorien*. Ex-Zeitschrift 2014, 2014, S. 82 – 89.
- [LAN13] **Langer, T.:** *Zündung von Wasserstoff/Luft-Gemischen durch repetierende Teilentladungen*, Dissertation, KIT Karlsruhe, 2013.
- [LAT95] **Latham, R.V. Hrsg.:** *High voltage vacuum insulation*. Basic concepts and technological practice. Academic Press, London, 1995.
- [LE87] **Lewis, B.; Elbe, G. von:** *Combustion, flames and explosion of gases*. Academic Press, Orlando (FL, USA), 1987, DOI: 10.1016/C2009-0-21751-.
- [LEV70] **Levitt, A. P.:** *Whisker Technology*. Wiley-Interscience, New York, 1970.
- [LIN87] **Lindmayer, M. Hrsg.:** *Schaltgeräte*. Grundlagen, Aufbau, Wirkungsweise. Springer-Verlag, Berlin, 1987.
- [LIP03] **Lippmann, H.-J.:** *Schalten im Vakuum*. Physik und Technik der Vakuumschalter. VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 2003.
- [LIT88] **Litvinov, E. A. et al.:** *An Explosive Emission Model of the Vacuum Arc Cathode Spot*. Proc. XIII International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 1988.
- [LTF18] **LTF Labortechnik GmbH & Co. KG:** *Pen-Ray® Zink- und Cadmiumlampen Datenblatt*, 23.08.2018 (abgerufen), [https://www.labortechnik.com/sites/default/files/uv\\_044\\_d\\_penray\\_zink\\_cadmium\\_lampen.pdf](https://www.labortechnik.com/sites/default/files/uv_044_d_penray_zink_cadmium_lampen.pdf).

- [MAG78] **Magison, E. C.:** *Electrical instruments in hazardous locations*. Instrument Society of America, Pittsburgh, 1978.
- [MAY43] **Mayr, O.:** *Beiträge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens*. Archiv für Elektrotechnik, 1943, Heft 12 (37), S. 588 – 608, DOI: 10.1007/BF02084317.
- [MIE73] **Mierdel, G.:** *Was ist Plasma?* VEB Verlag Technik, Berlin, 1973, DOI: 10.1002/piuz.19750060211.
- [MP89] **Mesyats, G. A.; Proskurovskij, D. I.:** *Pulsed Electrical Discharge in Vacuum*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989, DOI: 10.1002/ctpp.2150300505.
- [MS05] **Mende, D.; Simon, G.:** *Physik. Gleichungen und Tabellen*. Fachbuchverlag Leipzig Hanser, München, 2005, DOI: 10.3139/9783446438613.
- [NAS17] **NASA:** *Tin Whisker (and Other Metal Whisker) Homepage*, 28.06.2018 (abgerufen), <https://nepp.nasa.gov/whisker/>.
- [NOT23] **Nottingham, W. B.:** *A New Equation for the Static Characteristic of the Normal Electric Arc*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1923, Vol. 42, S. 302 – 310, DOI: 10.1109/T-AIEE.1923.5060874.
- [OSR18] **Osram GmbH:** *64361 HLX-A150-15 Halogenlampen, stromgesteuert, mit Sockel PK30d Produktdatenblatt*, 23.08.2018 (abgerufen), [https://www.osram.de/pia/ecat/Halogenlampen,%20stromgesteuert,%20mit%20Sockel%20PK30d-Halogenlampen,%20stromgesteuert-Speziallampen/de/de/GPS01\\_1028540/PP\\_EUROPE\\_DE\\_eCat/ZMP\\_1002323/](https://www.osram.de/pia/ecat/Halogenlampen,%20stromgesteuert,%20mit%20Sockel%20PK30d-Halogenlampen,%20stromgesteuert-Speziallampen/de/de/GPS01_1028540/PP_EUROPE_DE_eCat/ZMP_1002323/).
- [PAN12] **Panashchenko, L.:** *The Art of Metal Whisker Appreciation: A Practical Guide for Electronics Professionals*. NASA Goddard Space Flight Center, 14.07.2018 (abgerufen), [https://nepp.nasa.gov/WHISKER/reference/tech\\_papers/2012-Panashchenko-IPC-Art-of-Metal-Whisker-Appreciation.pdf](https://nepp.nasa.gov/WHISKER/reference/tech_papers/2012-Panashchenko-IPC-Art-of-Metal-Whisker-Appreciation.pdf).
- [PDK86] **Pavlov, M.; Djurovic, S.; Kobilarov, R.:** *Temperature measurement of the arc phase of a spark in air*. Journal of Physics D: Applied Physics, 1986, Vol. 19 (6), S. 1041 – 1046, DOI: 10.1088/0022-3727/19/6/018.
- [PES09] **Pesch, B.:** *Messen, Kalibrieren, Prüfen*. Messungen planen, durchführen, bewerten, optimieren und dokumentieren. Books on Demand, Norderstedt, 2009.
- [PHO14] **PHOTRON LIMITED:** *FASTCAM SA5 FASTCAM SA5RV Hardware Manual Revision 2.05E*, 23.08.2018 (abgerufen), [http://www.highspeedimaging.com/media/photron\\_manuals/FASTCAM\\_SA5&SA5RV\\_HW\\_Manual.pdf](http://www.highspeedimaging.com/media/photron_manuals/FASTCAM_SA5&SA5RV_HW_Manual.pdf).



- [PHY12] **Physikalisch-Technische Bundesanstalt:** *Final Report for Test Round "d"/"i" of the PTB Ex Proficiency Testing Program (Pilot Phase)*. Summary analysis of the results and graphical displays, Braunschweig, 2012.
- [QUE18] **Questar Corporation:** *QM 1 Long-Distance Microscope*, 23.08.2018 (abgerufen), <https://www.questarcorporation.com/qm1.htm>.
- [RAI03] **Raith, W. Hrsg.:** *Bergmann Schäfer Lehrbuch der Experimentalphysik Band 4*. Bestandteile der Materie Atome, Moleküle, Atomkerne, Elementarteilchen. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 2003.
- [RB92] **Raith, W.; Bahr, C. Hrsg.:** *Bergmann Schäfer Lehrbuch der Experimentalphysik Band 5*. Vielteilchensysteme. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1992.
- [RD84] **Rutscher, A.; Deutsch, H.:** *Plasmatechnik Grundlagen und Anwendungen*. Eine Einführung. Hanser, München, 1984.
- [REE63] **Reece, M. P.:** *The vacuum switch*. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1963, Vol. 110 (4), S. 793 – 802, DOI: 10.1049/piee.1963.0107.
- [RIE67] **Rieder, W.:** *Plasma und Lichtbögen*. Vieweg, Braunschweig, 1967.
- [RKK17] **Runge, T.; Kopp., T. H.; Kurrat, M.:** *Experimental Investigations on Electrical Plasma Conductivity in a Model Spark Gap for Surge Currents*. Plasma Physics and Technology Journal, 2017, Vol. 4 (1), S. 24 – 27, DOI: 10.14311/ppt.2017.1.24.
- [SBU17] **Shekhar, R. et al.:** *Ignition of a hydrogen–air mixture by low voltage electrical contact arcs*. Combustion and Flame, 2017, Vol. 186, S. 236–246, DOI: 10.1016/j.combustflame.2017.08.006.
- [SCH78] **Schebsdat, F.:** *Zündverhalten von Netzwerken eigensicherer Stromkreise mit konzentriert auftretender Kapazität und Induktivität bei Gleichstrom*. PTB-Bericht PTB-W-11, 1978.
- [SCH88] **Schlitt, H.:** *Regelungstechnik – physikalisch orientierte Darstellung fachübergreifender Prinzipien*. Vogel, Würzburg, 1988.
- [SE69] **Shobert, E. I.:** *Tutorial on Fundamentals: Sliding Contact Theory*: Holm Seminar on Electric Contact, 1969.
- [SHE18] **Shekhar, R.:** *Modelling of ignition by low voltage electrical discharges in explosion protection applications*. Dissertation, The University of Queensland, Brisbane, 2018.

- [SLA08] **Slade, P. G.:** *The vacuum interrupter*. Theory, design, and application. CRC Press, Boca Raton (FL, USA), 2008.
- [SLA14] **Slade, P. G.:** *Electrical contacts*. Principles and applications. CRC Press, Boca Raton (FL, USA), 2014.
- [SN35] **Semenov, N. N.:** *Chemical Kinetics and Chain Reactions*, London, 1935.
- [SO91] **Stokes, A. D.; Oppenlander, W. T.:** *Electric arcs in open air*. Journal of Physics D: Applied Physics, 1991, Vol. 24 (1), S. 26 – 35, DOI: 10.1088/0022-3727/24/1/006.
- [STA06] **Starikovskaia, S. M.:** *Plasma assisted ignition and combustion*: J. Phys. D: Appl. Phys, 2006, R265 – R299.
- [STE00] **Steen, H. Hrsg.:** *Handbuch des Explosionsschutzes*. Wiley-VCH, Weinheim, 2000.
- [STR13] **Strobl, C.:** *Störlichtbögen in Photovoltaikanlagen - modellbasierte Szenarien- und Detektierbarkeitsanalysen*. Kontaktverhalten und Schalten, VDE-Fachbericht, 2013, Vol. 69, S. 64 – 73.
- [TEK03] **Tektronix, I.:** *TCPA300/400 TCP300/400 AC/DC Bedienungsanleitung*, 23.08.2018 (abgerufen), <https://de.tek.com/current/tcpa300-manual/tcpa300-400-tcp300-400-instruction-manual>.
- [THE02] **Thedens, M.:** *Funkenzündung von Gasgemischen bei erhöhten Drücken und Temperaturen für die Zündschutzart Eigensicherheit*. PTB-Bericht PTB-ThEx23, Dissertation, TU-Braunschweig, 2002.
- [TOL72] **Tolson, P.:** *The Ignition of Flammable Atmospheres by Small Amounts of Metal Vapor and Particles*. Combustion and Flame, 1972, Vol. 18, S. 19 – 26.
- [UHF18] **Uber, C. et al.:** *Electrical discharges caused by opening contacts in an ignitable atmosphere – Part I: Analysis of electrical parameters at ignition limits*. International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE), Kansas City (MO, USA), 2018.
- [URB18] **Uber, C. et al.:** *Electrical discharges caused by opening contacts in an ignitable atmosphere – Part II: Spectroscopic investigation and estimation of temperature*. International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE), Kansas City (MO, USA), 2018.
- [USE17] **Uber, C. et al.:** *Methoden der Temperaturbestimmung von elektrischen Entladungen bei Öffnungs-Kontaktvorgängen in zündfähigen Gasen*. tm - Technisches Messen, 2017, Vol. 85, S. 56 – 64, DOI: 10.1515/teme-2017-0082.

- [USF17] **Uber, C. et al.:** *Experimental investigation of low-voltage spark ignition caused by separating electrodes*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, Vol. 49, S. 822 – 831, DOI: 10.1016/j.jlp.2017.03.015.
- [USG16] **Uber, C.; Shekhar, R.; Gerlach, U.:** *Ansatz zur Modellierung von Zündfunken durch elektrische Kontaktvorgänge für die Zündschutzart Eigensicherheit*. 14. BAM-PTB-Kolloquium zur chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik, S. 76 – 83.
- [USG17] **Uber, C.; Shekhar, R.; Gerlach, U.:** *Experimental investigation of the electrical characteristics of low-voltage contact-arcs in hydrogen-air mixture*. International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS), Boston (MA, USA), 2017.
- [VIN16] **Vinaricky, E. Hrsg.:** *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen*. Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren. Springer Vieweg, Berlin, 2016.
- [VOG80] **Vogt, G.:** *Untersuchungen der Zündung von explosionsfähigen Methan/Luft-Gemischen durch elektrische Entladungen in induktiven Stromkreisen von eigensicheren Betriebsmitteln für den Steinkohlebergbau*. Dissertation, TH Aachen. Mitteilungen der Westfälischen Berggewerkschaftskasse, Herne, 1980.
- [WAG71] **Wagar, H. N.:** *Performance Principles of Switching Contacts*. In (**Everitt, W. L. Hrsg.:**) Integrated device and connection technology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs N.J., 1971.
- [WGL13] **Wähner, A. et al.:** *Determination of the minimum ignition energy on the basis of a statistical approach*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, Vol. 26, S. 1655 – 1660, DOI: 10.1016/j.jlp.2013.06.002.
- [WHO08] **Wakatsuki, N.; Honnma, H.:** *Melting Phenomena and Arc Ignition of Breaking Relay Contacts*. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2008, S. 15 – 20, DOI: 10.1109/HOLM.2008.ECP.16.
- [WID66] **Widginton, D. W.:** *Ignition of methane by electrical discharges*. SMRE Research Report (Ministry of Power), 1966, No. 240.
- [WIE91] **Wiese, W. L.:** *Spectroscopic diagnostics of low temperature plasmas*. Techniques and required data. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 1991, Vol. 46 (6-7), S. 831 – 841, DOI: 10.1016/0584-8547(91)80084-G.

- [WM93] **Warnatz, J.; Maas, U.:** *Technische Verbrennung*. Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellbildung, Schadstoffentstehung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993, DOI: 10.1007/978-3-662-10266-4.
- [YOK09] **Yokogawa Meters & Instruments Cooperation:** *DL9040/DL9140/DL9240 Series Digital Oscilloscope Communication Interface USER'S MANUAL*, 23.08.2018 (abgerufen), <http://www.yokogawa.com/pdf/provide/E/GW/IM/0000019382/0/IM701310-17E.pdf>.
- [ZAL05] **Zalogin, A.:** *Study of the effect of material of spark test apparatus contacts on gas mixture ignition when testing intrinsically safe circuits*. 20th World Mining Congress & Expo2005, Tehran, 2005.
- [ZAL06] **Zalogin, A.:** *Исследование параметров искрообразующего механизма, рекомендованного Международной Электротехнической Комиссией (МЭК)*. Scientific research center "Industrial safety", Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service (Rostekhnadzor), 2006.
- [ZC74] **Zborovszky, Z.; Cotugno, L. A.:** *Evaluation of the Cadmium Disc Breakflash in testing Electrical Circuits*. A Comprehensive Study of Intrinsic Safety Criteria, Denver Research Institute - University of Denver. Bureau of Mines Open File Report 68 – 76, 1974.